INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



DESINTEGRACION DE LAS ROCAS

Agosto 1978

170 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 23
Agosto 1978

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITA: Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29
ESPAÑA

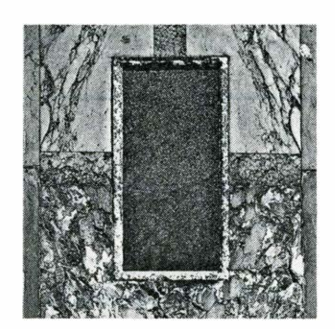
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

José L. Melena: *El primer antecedente de la escritura;* Ramón Pascual: *Núcleos ligeros exóticos;* Ramón Canal: *Máseres cósmicos;* Ramón Fontarnau y Frances E. Lynd: *El modelado de los tejidos en los embriones;* Luis Bou: *Teoría de complejidad;* Jorge Carreras: *La protección de la piedra;* Oleguer Escolá: *El comportamiento alimentario de los mosquitos;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Eduardo Petitpierre y Francisco Gil



LA PORTADA

La fotografía de la portada muestra una pieza de mármol en estado de deterioro, del exterior de la iglesia de Santa María dei Miracoli (Santa María de los Milagros) de Venecia (ver "La protección de la piedra", por K. Lal Gauri, en este mismo número). Las ocho losas de mármol que sirven de fachada exterior, se juntan en una intersección cubierta por una decorativa piedra rectangular de pórfido. Los trozos de mármol de la parte inferior muestran, en particular, los efectos de las reacciones producidas con gases atmosféricos disueltos en agua, tanto de lluvia como de la crecida que se produce periódicamente en Venecia, y de que es víctima la iglesia. El mármol está formado principalmente por calcita mineral, que es muy vulnerable a la acción del dióxido de carbono en solución. La calcita reacciona con esta solución formando a su vez productos que se disuelven, de manera que el mármol queda lixiviado. El dióxido de sulfuro, otro contaminante atmosférico, transforma la calcita en yeso que, por ser soluble, es susceptible de ser arrastrado por la lluvia, erosionándose así la piedra y exponiendo otras superficies nuevas a las inclemencias del tiempo.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)

Precio de venta de este número:

España: 170 pesetas
Extranjero: 2 U.S.$

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1870 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 30 U.S.$

Ejemplar atrasado ordinario:
190 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
270 pesetas

Difusión controlada por **OJD**

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada de David Lees

Página	Fuente
7	Musée du Louvre
8	Ernest R. Lacheman (*arriba*); Peabody Museum (*abajo*)
9	Musée du Louvre
10-13	Alan D. Iselin
14	Thomas C. Barger y Norah Barger
15	Pergamon Museum, Berlin
19-20	Gabor Kiss
21	Jef Poskanzer
22-25	Gabor Kiss
26	Gabor Kiss (*arriba y abajo derecha*), Yu. Batusov (*abajo izquierda*)
27-30	Gabor Kiss
33	Andrés Maldonado
34-36	A. Maldonado y A. Sellés
37	Andrés Maldonado
38	A. Maldonado y A. Sellés
39-40	Andrés Maldonado
42-44	A. Maldonado y A. Sellés
47	Jerome Kuhl
49	Kitt Peak National Observatory
50-57	Allen Beechel
60	Lorelle M. Raboni
61	Lorelle M. Raboni (*izquierda*); Richard Gordon, Universidad de Manitoba (*derecha*)
62	Lorelle M. Raboni
63	Antone G. Jacobson, Universidad de Texas
64	Lorelle M. Raboni
65	Antone G. Jacobson (*fotografías*); Lorelle M. Raboni (*dibujos*)
66	Lorelle M. Raboni (*arriba*); Richard Gordon (*abajo*)
67	Lorelle M. Raboni
69-76	Jerome Kuhl
79	Black Star
80-81	K. Lal Gauri, Universidad de Louisville
82	Photo Researchers, Inc.
83	Ilil Arbel
84	Ben Rose
87-88	Jack Colvard Jones, Universidad de Maryland
89-90	Tom Prentiss
91	Jack Colvard Jones
92	Tom Prentiss
95-96	New York Public Library
97	Escher Foundation, Haags Gemeentemuseum, La Haya
100-101	Ben Rose
102-104	Michael Goodman

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1)
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda.
Barcelona.
Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Señor Director:

En el número de marzo del año en curso, en la sección "Juegos matemáticos" de Investigación y Ciencia, aparece una brillante colaboración del firmante habitual de la misma, Martin Gardner, en la que se propone "presentar a Miguel Berrocal a los lectores, quizás el más sobresaliente de los escultores españoles vivos". Es obvio que Berrocal no necesitará de presentación entre sus lectores, pero coincido con Gardner en que no serán los más.

Sobre el minucioso trabajo es mi intención corregir un error, especificar una omisión y subsanar varios defectos, en el bien entendido de que lo último es a título meramente complementario.

En efecto, el pie de la fotografía superior de la página 108 es erróneo. No es Goliath, sino Richelieu quien aparece parcialmente desmontado. Esta escultura-múltiple de Berrocal sigue en importancia cuantitativa –por lo que respecta al número de sus elementos, que son 60– y en dificultad de ensamblaje y montaje al ya mencionado Goliath.

Por otro lado, el epígrafe de la fotografía inferior de la página 109 debería recordar que fue Cassinari el coautor de dicha escultura.

Por cuanto concierne a los "defectos", que insisto son de carácter informativo y complementario, las fechas de edición de las miniesculturas que ilustran las fotografías son: Goliath, 1968-1972; Portrait de Michèle, 1969; La Totoche, 1972; Mini David, 1968; Mini Cariatide, 1968-1969; Mini Maria, 1968-1969; Richelieu, 1968-1973; Romeo y Julieta, 1966-1967; Il Cofanetto (El Sepulcro), 1969-1974; Columbia Jet, 1969; Il Cavallo, 1973.

ABEL DE MAS

Profesor del Laboratorio de Física Nuclear
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
Universidad Politécnica de Barcelona

Señor Director:

El artículo de H. Arthur Klein "Bruegel el Viejo, guía para el estudio de la ciencia del siglo XVI" ("Investigación y Ciencia", mayo 1978) me interesó tanto por su contenido tecnológico como por la información que aportaba acerca del propio artista (el libro de Klein, *Graphic Worlds of Peter Bruegel the Elder,* lleva varios años en mi biblioteca). Su comentario sobre la grúa utilizada en la construcción que aparece en la portada me resulta, no obstante, algo curioso. Parece desprenderse de la reproducción que la grúa consiste básicamente en dos tambores coaxiales, el mayor de los cuales sirve de molino de rueda de escalones y el menor (posiblemente el mismo eje) recibe la cuerda elevadora que se enrolla a su alrededor. Si esta interpretación es correcta, el problema planteado en el texto ("¿Podían grúas de este tipo haber elevado todas las inmensas piedras de la torre?") puede resolverse sin dificultad. Si el radio del molino de rueda de escalones es diez veces mayor que el de su eje, entonces seis obreros, cada uno de los cuales pesara 90,8 kilogramos y ejerciera una fuerza igual a su peso, bastarían para elevar una piedra de 3 toneladas métricas, si no tenemos en cuenta pérdidas debidas a la fricción. Si, como parece más probable, ejercen su peso sobre un punto situado a una distancia de unos treinta grados de la vertical que cae del eje, podrían aún levantar una piedra de 1,5 Tm. Incluso si admitimos una pérdida de un 20 por ciento en fricción, podrían levantar 1,2 Tm. Si el número de obreros fuera de ocho resultaría posible ocuparse de pesos aún mayores.

LLOYD C. KANNENBERG

Departamento de Física
Universidad de Lowell

Señor Director:

Agradezco las observaciones del profesor Kannenberg acerca del papel desempeñado por la potencia en relación con la capacidad elevadora de máquinas movidas por tracción humana. Todo el problema radica en saber qué potencia puede desarrollar un equipo de hombres durante un largo período de tiempo. Voy a tratar de aclarar esto de manera quizá más explícita que en mi artículo.

Utilizaré el mismo guión, reparto y vestuario que sugiere el profesor Kannenberg: seis hombres de 90,8 kg se disponen a elevar una piedra de 3 Tm a una altura de, por ejemplo, unos 30 metros. Su grúa movida por tracción humana tiene un rendimiento mecánico, o una razón, de diez a uno.

La cuerda que pende del tambor elevador se sujeta a la gran losa y, en el momento en que los seis hombres entran en su jaula, podemos considerar que, en este aparato, pueden desarrollar en conjunto 0,6 HP o 45,63 kilográmetros por segundo. Suben rápidamente hasta que dejan sujetos, en posición vertical, a la pasarela al nivel del eje. Entonces su peso combinado de 544,8 kg ejerce una presión tangencial sobre el tambor y la cuerda levanta la piedra con una fuerza de diez veces 544,8, o sea, de 5448 kg.

Una fuerza neta hacia arriba de 2724 kg acelera a la piedra en este momento. Dada su masa, el valor de la aceleración es de 9,81 metros por segundo en cada segundo. En menos de una milésima de segundo la piedra ha alcanzado una velocidad hacia arriba de 0,00838 metros por segundo y la pasarela del tambor se mueve en relación a los trabajadores a 0,0838 metros por segundo. Esto constituye, en cierto modo, un límite, ya que una fuerza tangencial de 544,8 kg ejercida a una velocidad de 0,0838 metros por segundo implica un flujo de potencia de 45,6 kilográmetros por segundo, según se ha indicado más arriba.

Los trabajadores caen, por tanto, en una posición situada más o menos a 30 grados en el tambor. Caminan hacia arriba como si subieran por una pendiente de 30 grados. Cada 0,3 metros de movimiento en el tambor equivale a elevar 544,8 kilogramos unos 0,15 metros. Su fuerza combinada sobre la circunferencia es, por tanto, de 272,4 kg y la cuerda arrastra hacia arriba la piedra con una fuerza de sólo 2724 kg, lo mínimo imprescindible para compensar su peso. Por tanto, la piedra sigue elevándose a razón de 0,00838 metros por segundo sin acelerar ni decelerarse.

El resultado es que subir la piedra 30 metros requiere unos 3580 segundos, o

ERRATA

Número 17, febrero de 1978

Pág.	*columna*	*línea*	*dice*	*debe decir*
13	3	21-22	dentro de los límites estrechos (10^{-10} cm^2/seg)	dentro de límites estrechos (10^{-10}–10^{-11} cm^2/sg)
14	1	30	se acercan	se asoman
14	2	20	y el cese	pero no el cese

sea, prácticamente una hora. Los períodos de tiempo para la aceleración inicial hasta 0,00838 metros por segundo y la deceleración final desde esta velocidad hasta cero son demasiado pequeños como para que debamos tenerlos en cuenta. Por otra parte, partimos del presupuesto de que tanto la grúa como su polea no presentan fricción. Del mismo modo prescindimos de la masa de los tambores, de las cuerdas, etcétera.

Una hora para elevar las 3 Tm a 30 metros resulta bastante lento. Incluso un equipo formado por ocho hombres necesitaría más de 45 minutos. El equipo de seis hombres podría elevar 6 Tm a 30 metros en unas dos horas, 1,5 Tm en 30 minutos, etcétera. Todas estas cifras hacen pensar que el límite de potencia por cada hombre es de 0,1 HP, pero un equipo excepcionalmente fuerte y bien entrenado cuyos miembros pudieran generar 0,2 HP cada uno, o 1,2 HP en conjunto, podrían elevar 3 Tm en unos 30 minutos, lo que en modo alguno puede considerarse rápido. Dicho de otro modo: resulta imposible hacer estimaciones sin considerar la potencia que puede generar el equipo.

Una observación: si el equipo de 6 hombres con una capacidad combinada de 0,6 HP desearan elevar la piedra de 3 Tm, a la que nos referíamos al principio, a 30 metros, pero sin necesidad de subir a ángulos mayores que los que corresponden a la posición de 30 grados, podrían hacerlo siempre y cuando utilizaran una grúa cuyo rendimiento mecánico o razón fuera de 20 a uno, en lugar de 10 a uno. Es esencial que cada elevación empiece de manera tal que la cuerda arrastre hacia arriba la carga con mayor fuerza que aquella con la que la gravedad la empuja hacia abajo. A 30 grados, seis obreros de 90,8 kg ejercen una fuerza tangencial de 272,4 kg sobre el tambor. Esta fuerza debe multiplicarse hasta que sea sustancialmente mayor que el peso de la piedra de 3000 kg. Una razón de 20 a uno sería suficiente. Si se consideraran estrictamente el rendimiento mecánico o las relaciones de palancas, niños con paciencia podrían llegar a levantar camiones con ayuda de un gato o, en situación ideal, un pájaro mosca sería capaz de arrastrar a un hipopótamo. Fueron estas relaciones las que hicieron que Arquímedes se atreviera a afirmar que podía mover la misma tierra si disponía de un punto de apoyo adecuado para su super-palanca. En operaciones de elevación reales, no obstante, no puede ignorarse el factor tiempo. Esto implica que debemos considerar la potencia: el ritmo al que se realiza un trabajo o se transforma la energía.

H. ARTHUR KLEIN

Malibu, California.

Los autores

DENISE SCHMANDT-BESSERAT ("El primer antecedente de la escritura") es profesora adjunta de Arte de la Universidad de Texas en Austin, y directora adjunta del Center for Middle Eastern Studies de dicha Universidad. Nacida en Francia, estudió en la Ecole du Louvre de París y se trasladó a los Estados Unidos en 1964 para realizar una investigación sobre las colecciones arqueológicas del Oriente Próximo del Peabody Museum, de la Universidad de Harvard. En 1969, siendo miembro a la sazón del Radcliffe Institute, comenzó una investigación sobre los primeros usos de la arcilla en el Oriente Medio. Desde entonces, ha venido estudiando las colecciones de arcilla antiguas de los museos de los Estados Unidos, Europa y Oriente Medio, que se hallaban sin publicar, y ha realizado labor de campo en Francia, Irán e Israel.

JOSEPH CERNY y ARTHUR M. POSKANZER ("Núcleos ligeros exóticos") son químicos nucleares interesados en núcleos inestables. Cerny es profesor de química y director del departamento de química de la Universidad de California en Berkeley y también profesor de investigación en el Lawrence Berkeley Laboratory de dicho centro superior. Se graduó en ingeniería química en la Universidad de Mississipi y estuvo un año como becario Fulbright en la Universidad de Manchester. Terminó sus estudios en química en Berkeley, doctorándose en 1961. En 1974 Cerny recibió el primer Ernest Orlando Lawrence Memorial de la Atomic Energy Commission por su investigación. Poskanzer es profesor de investigación del Lawrence Berkeley Laboratory y director científico de Bevalac, "el único acelerador relativista de iones pesados del mundo". Se graduó en química y física en el Harvard College, graduándose en la Columbia University y se doctoró en química en 1957 en el Instituto de Tecnología de Massachusets. Después de nueve años en el Brookhaven National Laboratory pasó al Lawrence Berkeley Laboratory.

ANDRES MALDONADO ("El estancamiento de las aguas del mar Mediterráneo") es colaborador científico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Licenciado en Geológicas con premio nacional "Fin de Carrera", se doctoró en la Universidad de Barcelona en 1972. Ha trabajado como becario del British Council, de la Smithsonian Institution, National Science Foundation y National Geographic Society. Pertenece en calidad de asociado de investigación al Departamento de Paleobiología de la Smithsonian Institution y enseña, asimismo, en la Universidad de Barcelona.

DALE F. DICKINSON ("Máseres cósmicos") es lector de Astronomía en el Centro para Astrofísica del Harvard College Observatory y en el Smithsonian Astrophysical Observatory. Obtuvo la licenciatura en la Universidad de Texas en Austin, doctorándose en astronomía por la Universidad de California en Berkeley, en 1965. Tras un año postdoctoral como investigador asociado en el laboratorio de Radioastronomía de la Universidad de California, se desplazó al Centro para Astrofísica. Los temas que le interesan en investigación incluyen (además de los máseres celestes que analiza en su artículo) la física y la química de las nubes moleculares interestelares y la observación de "galaxias de Markarian y otros objetos exóticos extragalácticos" con radiotelescopios. Dickinson entrará de profesor asociado visitante de física en el Williams College, este otoño.

RICHARD GORDON y ANTONE G. JACOBSON ("El modelado de los tejidos en los embriones") han colaborado en estudios sobre desarrollo embrionario desde 1969, año en que se conocieron con motivo de un curso de verano sobre embriología en el Marine Biological Laboratory en Woods Hole, Mass. Gordon es profesor de patología y radiología en la Universidad de Manitoba y director allí del Computer Department for Health Sciences. Se graduó en matemáticas en la Universidad de Chicago, obteniendo su doctorado en fisicoquímica en la Universidad de Oregón en 1967. Después de haber trabajado en la Universidad de Colorado, en la Universidad de Columbia y en el Center for Theoretical Biology en la State University de Nueva York en Buffalo, Gordon se incorporó en 1972 a la Mathematical Research Branch, de los National Institutes of Health. Este año ha pasado a Manitoba. Además de diseñar modelos del desarrollo embrionario, investiga sobre la teoría de la tomografía axial computarizada. Con el tiempo, espera combinar sus campos de interés aplicando la tomografía para seguir los movimientos de las células dentro de embriones vivos. Jacobson es profesor de zoología en la Universidad de Texas en Austin. Estudió su carrera en el Harvad College y se graduó en embriología experimental en la Universidad de Stanford bajo la dirección de Twitty, doctorándose en 1955. Desde entonces ha venido trabajando en inducción embrionaria y morfogénesis.

NICHOLAS PIPPENGER ("Teoría de complejidad") es miembro del departamento de matemáticas del Thomas J. Watson Research Center, de la International Business Machines Corporation. Se graduó en ciencias naturales en el Shimer College de Illinois, a la edad de 18 años, y a continuación ingresó en el Instituto de Tecnologia (MIT) de Massachusetts donde se licenció en ingeniería eléctrica. Tras algunos años de trabajo en el Laboratorio de Instrumentación del MIT (hoy llamado Charles Stark Draper Laboratory) prosiguió sus estudios, y se doctoró por el MIT en 1973. Ese mismo años entró a formar parte del Watson Research Center. En la actualidad, Pippenger es profesor visitante asociado en la Universidad de Toronto.

K. LAL GAURI ("La protección de la piedra") es profesor de ciencias geológicas en la Universidad de Louisville. Natural de la India, se graduó en la Universidad de Punjab y se doctoró en geología en la Universidad de Bonn en 1964. Luego pasó un año realizando estudios postdoctorales en el Instituto de Tecnología de California, en donde se interesó por la paleontología y especialmente por "la evolución y estructura de tejido mineralizado en un grupo de braquiópodos fósiles". Estos estudios incluían el examen mediante microscopía electrónica de la fina estructura de conchas vivientes, para lo cual fue necesario reforzar químicamente la concha y el delicado tejido. Por sugerencia de un amigo en el departamento de Historia del Arte en Cal Tech, Gauri comenzó a desarrollar técnicas análogas para reforzar piedra meteorizada como ayuda para la conservación de la imaginería en piedra.

JACK COLVARD JONES ("El comportamiento alimentario de los mosquitos") es profesor de entomología en la Universidad de Maryland. Cursó la carrera en la Universidad de Auburn en Alabama y realizó su doctorado en la Universidad del estado de Iowa en 1950. Durante los ocho años siguientes trabajó en el "National Institutes of Health" investigando la anatomía y fisiología del mosquito de la malaria del sureste. Ha permanecido en la Universidad de Maryland desde 1958. Sobre su actual trabajo dice: "Aparte de mis compromisos como profesor de morfología y fisiología de los insectos, dedico normalmente la mayor parte de mi tiempo a la redacción de mi segundo libro sobre la anatomía de la langosta (Ortópteros)"

El primer antecedente de la escritura

Antes de que los sumerios inventaran la escritura, en Asia occidental se llevaban las cuentas mediante fichas de arcilla de diverso formato distintivo. Al parecer, estas fichas originaron los ideogramas sumerios

Denise Schmandt-Besserat

¿Qué es lo que condujo a la escritura? El arte escriptoria misma es un buen ejemplo de lo que los estudiosos del pasado denominan invención independiente, ya que se han desarrollado de forma aislada sistemas de escritura en épocas diferentes y en diferentes partes del mundo. Por ejemplo, puede remontarse un sistema determinado –el ideográfico chino– hasta su origen en signos arcaicos grabados en huesos escapulares de oveja o en caparazones de tortugas, en el segundo milenio a.C., a modo de instrumento para plantear preguntas al cielo. Unos 1000 años más tarde, un sistema de escritura totalmente independiente surgió justo en la otra punta del mundo, en América Central. Esta escritura combinaba un sencillo sistema de notación numérica con complicados jeroglíficos y era empleada, principalmente, para señalar las fechas de diversos acontecimientos de acuerdo con un elaborado sistema calendario.

Tanto la escritura china como la maya fueron invenciones relativamente tardías. Algún otro sistema de escritura debe haber sido el primero, y es a partir de este punto inicial de donde podemos comenzar la búsqueda de los antecedentes del arte escriptoria. Normalmente, se asigna a los sumerios de Mesopotamia el mérito de haber sido los primeros en escribir textos. Hacia el último siglo del cuarto milenio a.C., los funcionarios de las ciudades-estados sumerias como Uruk habían desarrollado un sistema para asentar cifras, pictogramas e ideogramas sobre superficies de arcilla preparada al efecto. (Un pictograma es una representación más o menos realista del objeto que se supone que representa; un ideograma es un signo abstracto.)

En Uruk, en 1929 y 1930, un equipo de arqueólogos alemanes dirigidos por Julius Jordan sacó a la luz numerosos ejemplos de estos asientos arcaicos. Los textos, unos mil en total, fueron analizados por vez primera por Adam Falkenstein y sus colaboradores. En la actualidad, descubrimientos adicionales han incrementado el número total de textos de la propia Uruk y de otros lugares, pero realizados al estilo de Uruk, hasta la cifra de unos cuatro mil, y los esfuerzos pioneros de Falkenstein están siendo continuados por Hans J. Nissen, de la Universidad Libre de Berlín, y su colaboradora Margaret W. Green.

Aunque las formas de arcilla empleadas por los escribas de Uruk son conocidas universalmente como tablillas, término este que tiene connotaciones de algo plano, en realidad son convexas. Cada signo se inscribía en la arcilla mediante un estilo o cálamo de madera, hueso o marfil, con uno de sus extremos romo y el otro aguzado. Básicamente, los caracteres eran de dos tipos. Los signos numéricos se imprimían dentro de la arcilla; todos los demás signos, tanto los pictogramas como los ideogramas, eran incisos con el extremo aguzado del cálamo. El repertorio de caracteres empleado por los escribas de Uruk era amplio; se estima en no menos de 1500 signos independientes.

Las hipótesis sobre el origen de la escritura postulan, por lo general, una evolución desde lo concreto a lo abstracto: una fase inicial pictográfica que, en el curso del tiempo y debido quizás al descuido escriptorio de los escribas, se hace cada vez más esquemática. Las tablillas de Uruk contradicen esta línea de pensamiento. La mayor parte de los 1500 signos (Falkenstein compiló 950 de ellos) son ideogramas enteramente abstractos; los escasos pictogramas representan animales salvajes, como el lobo o el zorro, o elementos de tecnología avanzada, como el carro o el mazo. Los textos de Uruk siguen, por supuesto, sin ser descifrados en su mayor parte y continúan siendo un enigma para los epigrafistas. Los escasos signos ideográficos que han sido identificados son aquellos que pueden ser remontados, fase por fase, desde un carácter cuneiforme conocido de épocas posteriores a un prototipo sumerio arcaico. A partir de aquellos contenidos textuales fragmentarios, que estas identificaciones permiten, parece que los escribas de Uruk registran, principalmente, asuntos como transacciones comerciales y ventas de tierras. Algunos de los términos que aparecen con mayor frecuencia son los de pan, cerveza, oveja, ganado mayor y vestimenta.

Tras los hallazgos de Jordan en Uruk, otros arqueólogos hallaron textos similares en otros lugares de Mesopotamia. Otros más se encontraron en el Irán: en Susa, Chogha Mish y en parajes tan alejados como Godin Tepe, unos 350 kilómetros al norte de Uruk. En años recientes, se han exhumado tablillas escritas en el estilo de Uruk en Siria, en Habuba Kabira y Jebel Aruda, unos 800 kilómetros al noroeste. En Uruk, las tablillas habían sido encontradas en un conjunto de dependencias del templo; del resto, la mayor parte salieron a la luz en las ruinas de casas privadas, en las que la presencia de sellos y de tapones de arcilla para jarras marcados con improntas de sellos testimonia cierto tipo de actividad mercantil.

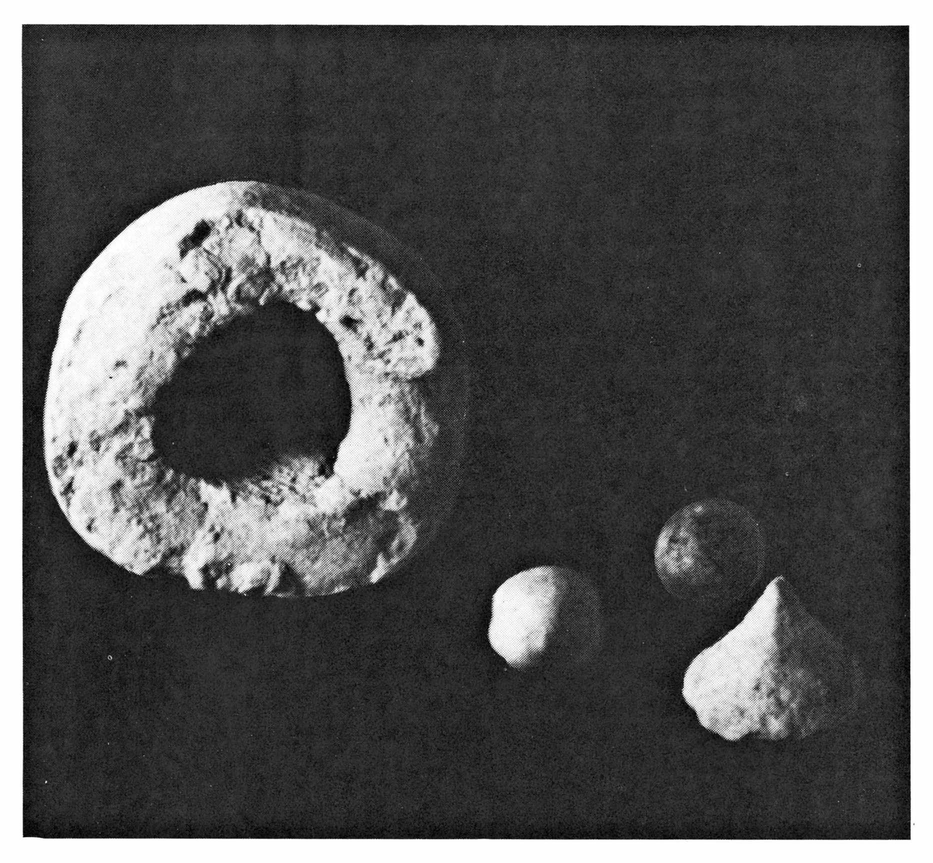
El hecho de que los textos de Uruk contradigan la hipótesis de que la primera forma de escritura debería ser pictográfica, ha inclinado a numerosos epigrafistas a sostener que dichas tablillas, aun cuando encierren la escritura conocida más antigua, deben representar una fase ya avanzada de la evolución del arte escriptoria. Se ha revitalizado de nuevo, pues, la hipótesis pictográfica. El hecho de que no haya aparecido aún ninguna escritura de este tipo

FICHAS DE ARCILLA PROCEDENTES DE SUSA, ciudad excavada en el Irán *(página opuesta)*. **Las fichas, que se hallan en la colección del Musée du Louvre, tienen una edad de 5000 años. Las 5 fichas de la fila de arriba representan algunos de los formatos más comunes: una esfera, una media esfera, un disco, un cono y un tetraedro. Las fichas de la segunda fila, más elaboradas, están marcadas con incisiones o impresiones. Versiones perforadas y sin perforar de fichas similares aparecen en las filas tercera y cuarta. Las fichas de las dos últimas filas varían en formato y marcas; algunas pueden ser equiparadas con primitivos ideogramas sumerios** *(para una comprensión global, véanse las ilustraciones que aparecen en las páginas 12 y 13).*





TABLILLA HUECA EN FORMA DE HUEVO, encontrada en las ruinas del palacio de Nuzi, ciudad excavada en Mesopotamia, del segundo milenio a.C. La inscripción cuneiforme que aparece en su superficie recoge 48 animales. Al abrirse, se encontró en su interior 48 fichas. Las fichas se perdieron antes de que se hubiera preparado una descripción fidedigna, pero los textos de Nuzi sugieren su empleo en el cómputo.



BULLA ESFERICA, o envoltorio de arcilla con fichas en su interior, exhumada de los niveles del tercer milenio a.C. en Tepe Yahya, yacimiento de la parte centromeridional del Irán, a mitad de camino entre el valle del Indo y la Baja Mesopotamia. En su interior, había tres fichas *(derecha)*: un cono y dos esferas.

en yacimientos del cuarto milenio a.C., e incluso de fecha anterior, se explica bien suponiendo que la escritura de los primeros milenios se registró exclusivamente en materiales escriptorios perecederos, tiempo ha desintegrados, como el pergamino, el papiro o la madera.

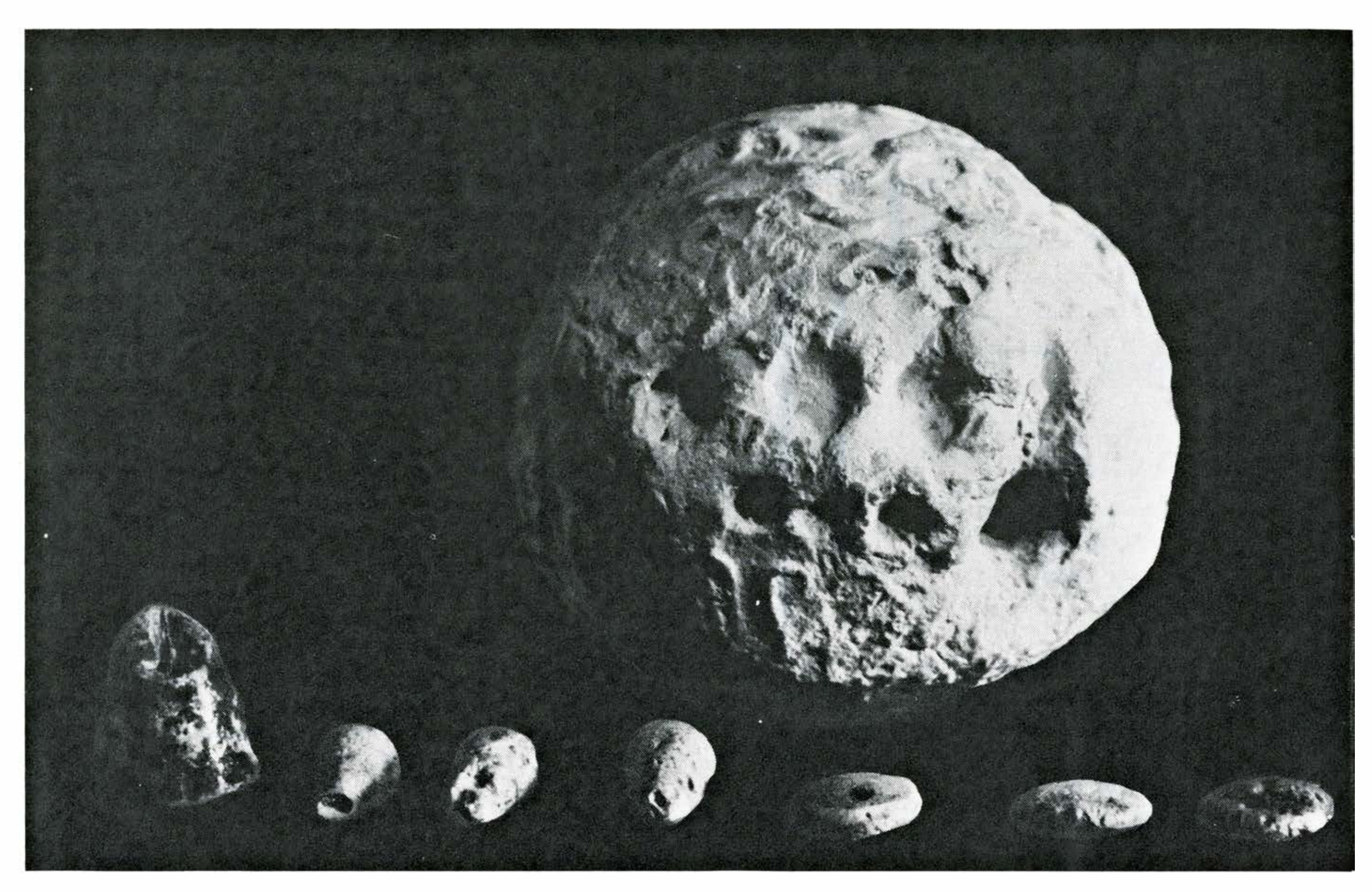
Por mi parte, puedo proponer otra alternativa. Mi investigación sobre los primeros usos de la arcilla en el Próximo Oriente, en estos últimos años, sugiere que diversas características del material de Uruk ofrecen claves importantes para saber qué tipos de símbolos visibles precedieron realmente a los textos sumerios arcaicos. Dichas claves incluyen: la elección de la arcilla como material para documentos, el perfil convexo de las tablillas de Uruk y la apariencia de los caracteres que figuran en las mismas.

Nuzi, una ciudad iraquí del segundo milenio a.C., fue excavada por la American School of Oriental Research de Bagdad, entre 1927 y 1931. Unos treinta años más tarde, al reseñar un análisis de los archivos del palacio de Nuzi, A. Leo Oppenheim, del Instituto Oriental de la Universidad de Chicago, informó sobre la existencia de un sistema de asientos que hacía uso de "fichas". Según los textos de Nuzi, dichas fichas se empleaban con fines contables; se decía de ellas que estaban "depositadas", "transferidas" y "suprimidas".

Oppenheim imaginó un tipo dual de sistema contable en los textos de Nuzi: además de los elaborados documentos cuneiformes de los escribas, la administración palaciega poseía unas cuentas tangibles paralelas. Por ejemplo, una ficha de una clase determinada podría representar cada uno de los animales de los rebaños del palacio. Cuando, en la primavera, hubieran nacido nuevos animales, se añadiría un número igual de fichas nuevas; cuando se sacrificaran animales, se sustraería el número apropiado de fichas. Se trasladaban las fichas de un estante a otro, probablemente, cuando los animales se movieran de un aprisco o dehesa a otro, cuando las ovejas fueran esquiladas, y así sucesivamente.

El hallazgo de una tablilla hueca, en forma de huevo, en las ruinas del palacio reforzó la hipótesis de Oppenheim. La inscripción que figura en la superficie de la tablilla resultó ser una lista de 48 animales. Esta tablilla hueca resonaba y, cuando se abrió cuidadosamente un extremo de la misma, se hallaron en su interior 48 fichas. Presumiblemente, esta combinación de una lista escrita y fichas contables representaba una transferencia de animales desde un servicio de palacio a otro. Desgraciadamente, no poseemos una descripción fidedigna de las fichas, que posteriormente se perdieron.

Los archivos de Nuzi se datan en torno



BULLA DE SUSA, que presenta dos filas de impresiones en su superficie, emparejadas, en número y formato, con las fichas que contenía *(primer término)*: un cono grande, tres conos *(izquierda)* y tres discos *(derecha)*. Las tablillas con representaciones incisas de las fichas se desarrollaron, seguramente, más tarde.

al 1500 a.C. El gran yacimiento arqueológico elamita de Susa presenta niveles que son anteriores en más de 1500 años. La excavación de Susa, llevada a cabo por investigadores franceses, comenzó en la década de 1880 y continúa hasta hoy. Seis años después del informe de Oppenheim (1958), Pierre Amiet, del Musée du Louvre, pudo confirmar la existencia de un sistema contable similar en Susa. Los receptáculos de fichas de Susa, a diferencia de los de Nuzi, eran esferas de arcilla huecas. Amiet las llamó "bullae"; hasta hoy, se han hallado unas 70 de éstas. Las fichas que contienen son pellas de arcilla modeladas en una gran variedad de formas geométricas, que incluyen esferas, discos, cilindros, conos y tetraedros.

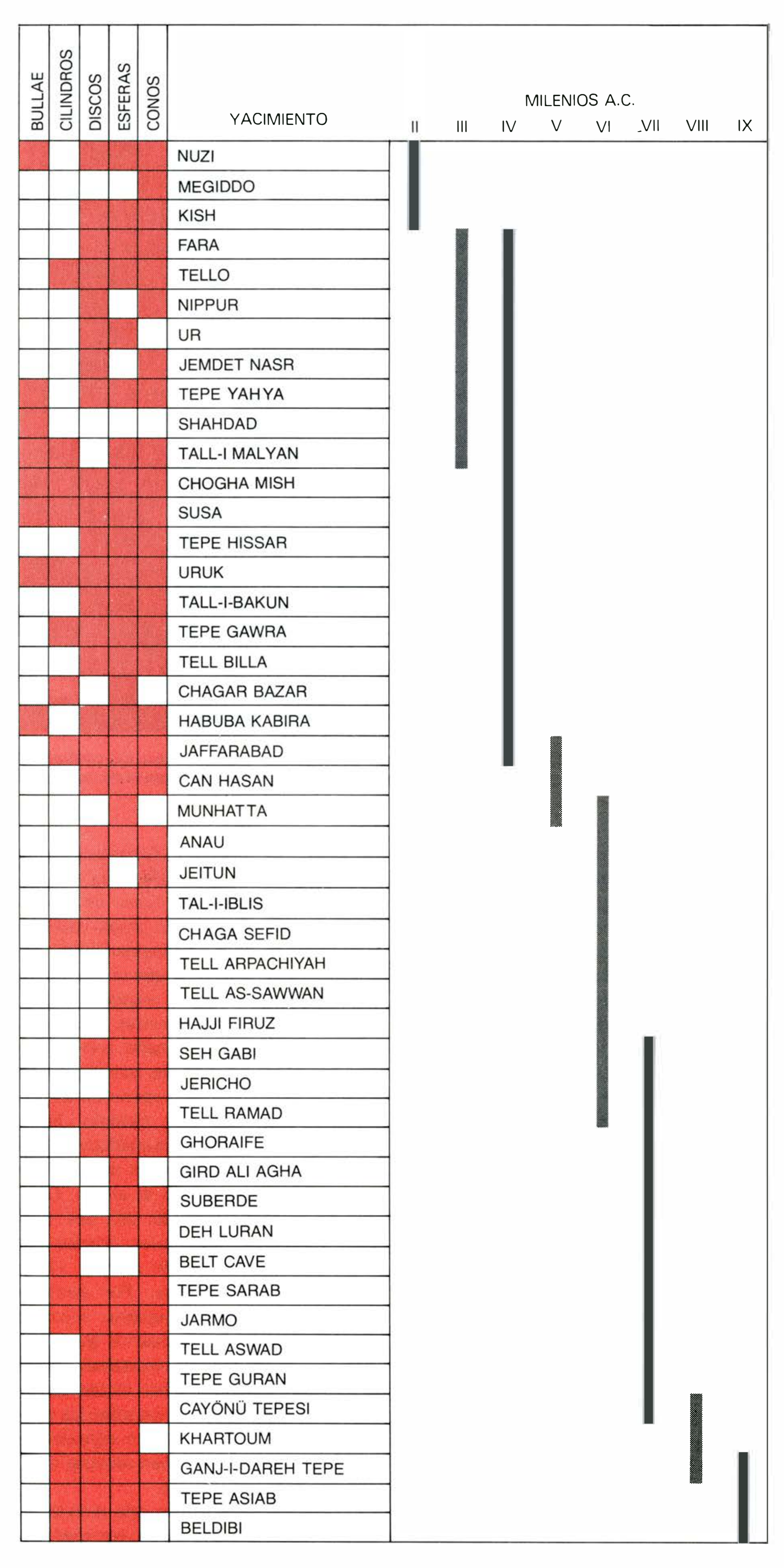
El hallazgo de Amiet fue de gran significación; no sólo demostró que las bullae y las fichas existían al menos un milenio y medio antes de que aparecieran en Nuzi, sino que puso también de manifiesto que eran tanto o más antiguas que los primeros documentos escritos de Uruk. Más tarde quedó bien claro, desde luego, que las fichas al menos eran mucho más antiguas.

En 1969, comencé un proyecto de investigación, cuyo objetivo final consistía en descubrir cuándo y en qué formas llegó a utilizarse la arcilla en el Próximo Oriente. La manufacturación de cerámica constituye, por supuesto, el uso más familiar de la arcilla, pero, antes de la aparición de la cerámica, el hombre ya estaba fabricando cuentas de arcilla, modelando figurillas de arcilla, moldeando adobes de arcilla y empleando esta materia como mortero. Como punto de partida de mi proyecto, visité los museos de los Estados Unidos, de Europa y de diversas ciudades del Próximo Oriente que poseían colecciones de artefactos de arcilla con una datación de hasta el séptimo, octavo y noveno milenios a.C. Este intervalo de tiempo, que principia hace unos 11.000 años y acaba hace poco más de 8000 años, contempló el establecimiento firme de los primeros asentamientos agrícolas en Asia occidental.

En las colecciones de los museos, junto con las cuentas, adobes y figurillas, que había esperado encontrar, me topé con lo que para mí constituyó una categoría de objetos imprevista: unos pequeños artefactos de arcilla de formas diversas. Tal como más tarde llegué a darme cuenta, las formas eran similares a las que Amiet había encontrado en el interior de sus bullae de Susa: esferas, discos, conos, tetraedros, ovoides, triángulos (o formas de media luna), formas bicónicas (dos conos unidos por su base), rectángulos y otras formas singulares de difícil descripción. ¿Pudieron haber servido también de fichas estos artefactos, algunos de los cuales eran anteriores en 5000 años a las fichas de Susa?

Comencé a compilar mi propio catálogo independiente de estas singularidades, recogiendo toda ficha de la que se conocía su yacimiento específico de origen. En resumen, encontré que, mientras que todas ellas eran de reducido tamaño, con dimensiones medias de uno a dos centímetros en su parte mayor, muchas aparecían en dos formatos distintos. Por ejemplo, había conos pequeños, de aproximadamente un centímetro de altura, y conos mayores, de tres o cuatro centímetros de altura. También había discos finos, de sólo tres milímetros de espesor, y otros gruesos, de hasta dos centímetros de espesor. Otras variaciones eran patentes. Por ejemplo, aparte de las esferas completas, encontré cuartos, mitades y tres cuartos de esfera. Algunas de las fichas presentaban rasgos adicionales. Muchas estaban incisas con líneas profundas; otras tenían sobre las mismas unas pequeñas bolitas o espirales de arcilla y otras más portaban someras marcas circulares de punzón.

Todas las fichas habían sido modeladas a mano. Bien se había rodado entre las palmas de las manos una pequeña pella de arcilla, bien se había apretado ésta con las puntas de los dedos. La arcilla era de fina



LOS YACIMIENTOS en los que aparecen las fichas representan un lapso de tiempo que va del noveno milenio a.C. al segundo. Hasta 20 variantes de los cuatro formatos de ficha básicos están presentes en los lugares de mayor antigüedad. Los envoltorios de arcilla no habrían de aparecer antes del cuarto milenio a.C.

textura, pero no presentaba signos de preparación especial alguna (como la adición de sustancias reductoras, una práctica de la fabricación cerámica que aumenta la dureza tras la cochura). Todas las fichas, empero, habían sido cocidas para garantizar su durabilidad. La mayor parte de las mismas presentaba variada coloración, desde el tostado al rojo, pero había algunas que resultaron grises e incluso negruzcas.

Hallé que estas fichas estaban presentes en, virtualmente, todas las colecciones de los museos de artefactos del período Neolítico del Asia occidental. Un ejemplo extremo de su abundancia lo ofrece la primitiva aldea de Jarmo, en el Irak, ocupada por vez primera hace unos 8500 años. Jarmo ha proporcionado un total de 1153 esferas, 206 discos y 106 conos. Los informes indican, por lo general, que los excavadores encontraron las fichas desperdigadas por los suelos de las casas, situadas en distintos lugares de un yacimiento. Si las fichas se habían guardado alguna vez en recipientes como canastas o bolsas, éstos se habían desintegrado hace ya tiempo. No obstante, no hay testimonios que sugieran que las fichas estaban separadas de otros artefactos e incluso que impliquen cuál era su función. Los informes indican que muchas fueron halladas en grupos de 15 o más y que dichos grupos se localizaban en las áreas de almacenes dentro de las casas.

Según repasaba las colecciones de los museos y los informes de los yacimientos arqueológicos en cuestión, quedé enormemente perpleja por la manifiesta omnipresencia de las fichas. Se habían hallado en lugares que van desde el lejano oeste, como Beldibi, en lo que hoy es la Turquía sudoccidental, hasta el lejano oriente, como Chanhu Daro, en lo que hoy es Paquistán. Se han exhumado fichas incluso en un yacimiento del octavo milenio a.C. a orillas del Nilo, en las proximidades de Jartúm.

Al mismo tiempo, encontré que algunos informes de excavaciones dejaban de tomar nota de las fichas que se habían recogido o las mencionaban sólo casualmente. Cuando se tomaba nota de estas fichas, el encabezamiento podría rezar: "objetos de finalidad incierta", "juguetes infantiles", "piezas de juego" o "amuletos". A modo de ejemplo, las fichas procedentes de Tello, en el Irak, fueron interpretadas por su descubridor, Henri de Genouillac, como amuletos que expresaban el deseo de los residentes de una "identificación personal". Otro ejemplo aparece en el informe de Carleton S. Coon sobre la Cueva Belt del Irán: "De los niveles 11 y 12 proceden cinco misteriosos... objetos de arcilla, que no se parecen a nada en el mundo; si acaso, a supositorios. Cualquiera puede conjeturar para qué se emplearon".

DISTRIBUCION GEOGRAFICA de las fichas. Comprende desde las orillas iranias del Caspio, por el norte, hasta Jartúm, por el sur, y desde Asia Menor hasta el valle del Indo, al oriente. Los yacimientos identificados aquí sólo con puntos dentro de un rectángulo aparecen con sus nombres en el mapa de abajo.

EL AGRUPAMIENTO DE YACIMIENTOS en la cuenca de los cursos superior e inferior del Tigris y del curso inferior del Eufrates y en la región de Zagros del Irán más bien refleja la existencia de estudios accesibles que una medida del ámbito y frecuencia reales del uso de fichas en esa misma zona.

Existían serios impedimentos para la captación del hecho de que todas estas fichas eran artefactos de la misma clase, debido a que, cuando se enumeraban en los informes de las excavaciones, por lo general, no aparecían bajo un solo capítulo, sino bajo capítulos diversos, según su formato. Por ejemplo, se habían descrito los conos como figurillas femeninas esquemáticas, como símbolos fálicos, como piezas de juego y como clavos; las esferas, la mayor parte de las veces, eran interpretadas como canicas o proyectiles de honda.

Por haber estudiado en la École du Louvre, me era conocida la obra de Amiet. Sin embargo, había compilado ya un catálogo de cientos de estas fichas, antes de reparar en cuán similares a las fichas de Amiet, procedentes de Susa, eran estos artefactos de arcilla de mayor antigüedad. Al principio, parecía imposible que pudiera haber una relación entre ambos grupos; un mínimo de 5000 años separaban las fichas de época neolítica de las de Susa, de la Edad del Bronce. Según ampliaba mis investigaciones para dar cabida a los artefactos de arcilla más tardíos, con una datación del séptimo milenio a.C. al cuarto milenio y aún posteriores, encontré, para mi sorpresa, que se habían hallado fichas de arcilla similares, en cantidades sustanciales, en yacimientos representativos de todo este lapso de tiempo. Evidentemente, un sistema de contabilidad que hacía uso de fichas se había difundido no sólo en Nuzi y Susa, sino por todo el Asia occidental, desde una época tan remota como el noveno milenio a.C. hasta épocas tan cercanas como el segundo milenio.

El sistema parece haber sido casi idéntico a otros muchos métodos de contabilidad primitivos, e incluso no tan primiti-

TOKEN TYPE I		II		III		IV		V		VI	
ESFERA		DISCO		CONO		TETRAEDRO		BICONOIDE		OVOIDE	
FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS
	NUMERO 10		PLAZA		NUMERO 1				BUENO, DULCE		CLAVO
	NUMERO 10		PRENDA, PAÑO		NUMERO 60				DECISION LEGAL, JUICIO, PAZ		ACEITE
	NUMERO 10		PRENDA, PAÑO		NUMERO 600				CORAZON, MATRIZ		¿ANIMAL? (SIN IDENTIFICAR)
	NUMERO 100 o 3600		LANA		PAN		PRENDA, PAÑO		BRAZALETE, ANILLO		
	NUMERO 36.000		GANADO LANAR		PERFUME				LUGAR, PAIS		
			OVEJA								

ESTAS CINCUENTA Y DOS FICHAS, representativas de las 12 principales categorías de tipos de ficha, han sido equiparadas aquí con caracteres incisos que aparecen en las primeras inscripciones sumerias. La mayor parte de las inscripciones no pueden leerse. En la ilustración, si el significado del símbolo es

vos. Los filólogos clásicos están familiarizados con el sistema romano de hacer "cálculos" con guijarros (*calculi* en latín). Hasta el final del siglo XVIII, el Tesoro Británico operaba todavía con fichas para calcular los impuestos. En cuanto a eso, los pastores del Irak hasta hoy en día emplean guijarros para llevar cuenta de las cabezas de sus rebaños, y el ábaco constituye aún el instrumento normal de cálculo en los mercados de Asia. El arcaico sistema de fichas del Asia occidental era, quizá, sólo algo más complicado que sus correlatos posteriores.

Considerado en su totalidad, el sistema tenía unas 15 clases principales de fichas, divididas luego en unas 200 subclases, basadas en el tamaño, marcas o variación fraccional, como en el caso del cuarto, mitad y tres cuartos de esfera. Evidentemente, cada formato específico poseía un significado propio; unas pocas parecen representar valores numéricos y otras objetos específicos, en particular géneros mercantiles.

No es necesario teorizar sobre algunos de estos significados; varios ideogramas que aparecen en las tablillas de Uruk reproducen, casi exactamente, en dos dimensiones muchas de las fichas. Por ejemplo, los signos arbitrarios de Uruk para los numerales, como una pequeña impresión en forma de cono para el uno, otra circular para el número diez y una impresión en forma de un cono mayor para el 60, tienen su correlato en las fichas en forma de: conos pequeños, esferas y conos grandes. Otros ejemplos más de ideogramas que se compadecen con fichas incluyen, bajo el capítulo general de géneros, el símbolo de Uruk para la oveja (un círculo con una cruz en su interior), emparejado con fichas

VII		IX		XI		XIII		XIV		XV	
CILINDRO		TRIANGULO		RECTANGULO		VASIJA		ANIMAL		VARIA	
FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS	FICHAS	PICTOGRAMAS SUMERIOS
	MADERA						TIPO DE VASIJA		PERRO		LECHO
			VASIJA PETREA		GRANERO		VASIJA DE LECHE DE OVEJA		VACA		
			METAL				TIPO DE VASIJA		LEON		
			COLINA				TIPO DE VASIJA				
					ESTERA, ALFOMBRA						

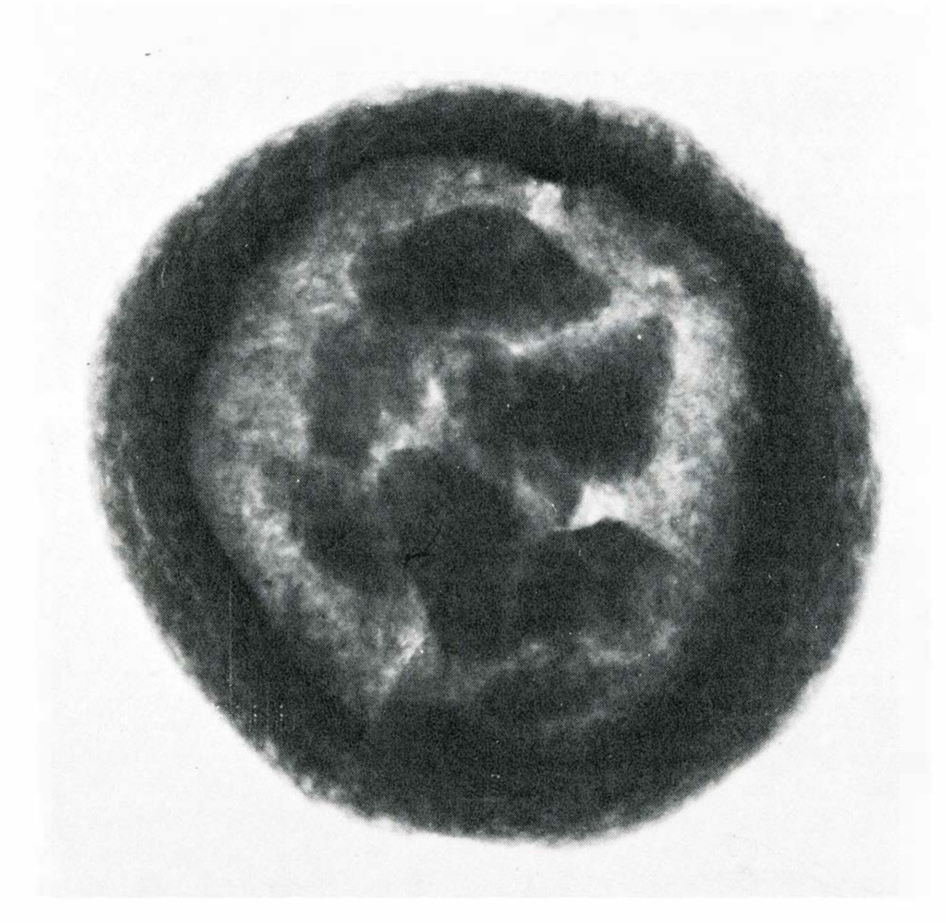
conocido, aparece la palabra española equivalente. Los símbolos numéricos sumerios equiparados con las distintas fichas esféricas y cónicas son impresiones reales en la superficie de la tablilla. En dos casos *(esfera),* se añaden líneas incisas; en un tercer caso *(cono),* se agrega una marca hecha con punzón circular.

en forma de disco con una cruz incisa, y el símbolo de Uruk para una prenda de vestir (un círculo con cuatro líneas paralelas en su interior), equiparado a fichas en forma de disco con cuatro líneas paralelas incisas. Otros ejemplos más son los ideogramas para metal y aceite y, más claramente, los símbolos pictográficos para el ganado mayor, perros y lo que, evidentemente, son vasijas: cada signo de las tablillas puede ser emparejado con una ficha de forma y marcas similares. Además, las formas de muchos ideogramas sumerios aún por descifrar parecen reflejar las de otras fichas.

¿Por qué llegó a existir este repertorio de símbolos tridimensionales? No puede tratarse de una mera coincidencia el hecho de que las primeras fichas aparecieran en las primeras fases del período Neolítico, época de profundos cambios en la sociedad humana. Fue entonces cuando un modelo de subsistencia anterior, basado en la caza y la recolección, se transformó por el impacto del cultivo de plantas y la domesticación de animales y el desarrollo de una forma de vida agrícola. La nueva economía agrícola, aunque indudablemente aumentó la producción de alimentos, se habría visto acompañada de nuevos problemas.

Quizás el más crucial habría sido el almacenamiento de alimentos. Cierta porción de cada cosecha anual tenía que ser asignada para la propia subsistencia de la familia agrícola y otra porción debía separarse como simiente para la cosecha del año venidero. Otra porción más podría haberse reservado para trocarla con aquellos que estuvieran dispuestos a proporcionar productos exóticos y materias primas a cambio de alimentos. Parece posible que la necesidad de no perder de vista estos distintos cupos y transacciones fue suficiente para estimular el desarrollo de un sistema de registro.

Las fichas más antiguas que se conocen en la actualidad son las procedentes de dos yacimientos de la región de Zagros, en el Irán: Tepe Asiab y Ganj-i-Dareh Tepe. Las gentes de ambas comunidades parecen haber guardado rebaños y, posiblemente, estaban experimentando con cosechas en torno al 8500 a.C., aunque por la misma época continuaban practicando la caza y recolectando plantas silvestres. Las fichas de arcilla que fabricaron tenían formas bastante sofisticadas. Había cuatro tipos de fichas básicos: esferas, discos, conos y cilindros. Además, había tetraedros, ovoides, triángulos, rectángulos, espirales encorvadas y formas animales esquemáticas. Los subtipos comprendían medias esferas y medios conos, esferas y discos con incisiones y marcas de punzón. El conjunto totalizaba 20 símbolos independientes.



LOS RAYOS X revelan la existencia de fichas, unas en apariencia conos y otras ovoides, en una bulla sin abrir. La datación de la bulla se desconoce; se trataba de un hallazgo aislado en superficie, cerca de Dhahran.

El período Neolítico y el siguiente período Calcolítico, o Edad del Cobre, en Asia occidental, se extendieron por espacio de 5000 años. En todo este lapso de tiempo sustancial, no se encuentran, sorprendentemente, cambios de las fichas, hecho que puede indicar cuán bien se adaptaba a las necesidades de una primitiva economía agrícola este sistema de registro. Hacia el 6500 a.C., unos 2000 años después del nacimiento de las primeras comunidades agrícolas de Zagros, otra aldea del Irán, Tepe Sarab, comenzó a florecer. El inventario de fichas procedentes de las excavaciones de Tepe Sarab no presenta aumento alguno en el número de tipos principales y sí, en cambio, un aumento en los subtipos de sólo 20 a 28, entre los cuales figura una pirámide de cuatro lados y un bucranio estilizado que, probablemente, representa al ganado mayor.

Fue quizá durante el período Calcolítico cuando los excedentes agrícolas de cada miembro de la comunidad empezaron a reunirse mediante impuestos en especie, con la supervisión del excedente puesta en manos de funcionarios públicos como los servidores de los templos. Si las cosas fueron así, la necesidad de llevar buena cuenta de las contribuciones individuales, evidentemente, no supuso una modificación relevante en el sistema de registro. Las fichas exhumadas en cuatro lugares que florecieron entre el 5500 y el 4500 a.C. –Tell Arpachiyah y Tell as-Sawwan, en el Irak, y Chaga Sefid y Jaffarabad, en el Irán– no reflejan otra cosa que desarrollos menores. Aparece un nuevo tipo de ficha, la de forma bicónica, y entre algunos de los subtipos unas líneas y puntos pintados de negro han sustituido a las incisiones y marcas de punzón.

En las primeras fases de la Edad del Bronce, entre el 3500 y 3100 a.C., se dieron cambios significativos en el sistema de registro. Este período conoció un avance económico casi tan notable, en su propia forma, como el nacimiento de la economía agrícola, que sentó las bases de aquél. El nuevo desarrollo fue la aparición de las ciudades. Los estudios de conjunto de los yacimientos antiguos del Asia occidental indican un drástico aumento de la población de Irak e Irán; centros urbanos con numerosos habitantes comienzan a aparecer aledaños de los anteriores asentamientos aldeanos.

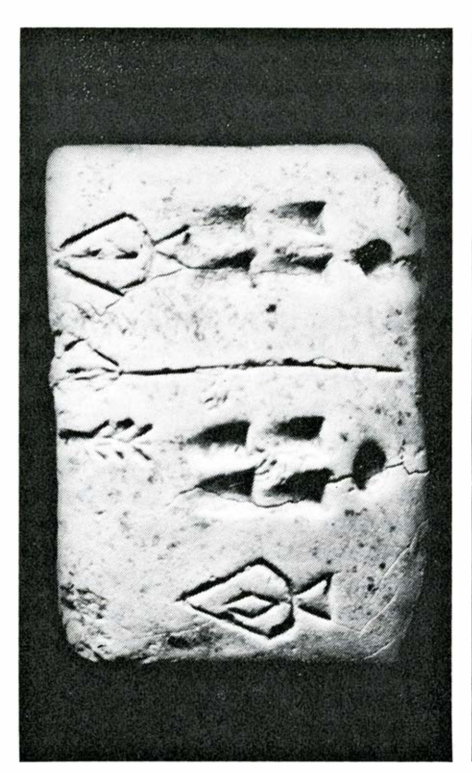
En esta época, aparecieron la especialización artesana y los comienzos de la producción en masa. Los broncistas y sus productos dan nombre a esta Edad, pero, además de los herreros, surgieron también otros artesanos, concentrados en diversas áreas. La invención de la rueda de alfarero permitió el desarrollo de una industria ce-

rámica y el producto de los distintos hornos de producción masiva llegó a distribuirse a grandes distancias. Una corriente similar se hace patente en la manufactura de vasijas pétreas. El desarrollo de una red comercial ampliada está indicado por la aparición en el Irak de materiales tan exóticos como el lapislázuli.

El despliegue de una economía urbana, enraizada en el comercio, debe haber multiplicado las demandas sobre el sistema tradicional de registro. Tenía que anotarse no sólo la producción, sino inventarios, fletes y pagos de salarios, y los mercaderes necesitaban guardar constancias de sus transacciones. Hacia el último siglo del cuarto milenio a.C., la presión de una compleja contabilidad comercial sobre el sistema de fichas se hizo patente, tanto en los símbolos como en la forma en que se emplearon las fichas.

Para considerar los símbolos en primer lugar, seis yacimientos de finales del cuarto milenio a.C., en el Irak (Uruk, Tello y Fara), en el Irán (Susa y Chogha Mish) y en Siria (Habuba Kabira), nos han legado fichas representativas de la gama completa de las formas primitivas. Además, aparecen algunas formas nuevas, entre las que se cuentan las parábolas, los romboides y unas réplicas de vasijas. Sin embargo, aún más significativas que la aparición de nuevas formas es la proliferación de subtipos, indicada por una variedad de marcas incisas sobre las fichas. Es también ahora cuando unas pocas fichas comienzan a presentar marcas aplicadas: bolitas o espirales de arcilla añadidas a las propias fichas.

Los seis lugares mencionados nos han proporcionado un total de 660 fichas que datan de hacia el 3100 a.C. De este total, 363, es decir, el 55 por ciento, están marcadas con incisiones. La mayor parte de estas incisiones son profundos surcos, realizados en el extremo aguzado de un cálamo; los surcos están situados en lugares visibles y con un claro cuidado por la simetría. Sobre las fichas de forma redondeada, como esferas, conos, ovoides y cilindros, las incisiones usualmente corren parejas a lo largo del ecuador y, de esta forma, son visibles desde cualquier lado. Sobre las fichas planas, como discos, triángulos y rectángulos, las incisiones aparecen sólo sobre una cara.




ESTAS TABLILLAS DE URUK muestran el formato convexo que puede reflejar su evolución a partir de bullae huecas. Las impresiones representan cifras. Se hallan guardadas en el Museo de Pérgamo, de Berlín.

La mayor parte de las incisiones presentan un motivo de líneas paralelas, si bien se hallan incisos también cruces y motivos entrelazados. El número de líneas paralelas no parece deberse al azar: pueden existir hasta 10 incisiones y las frecuencias de los modelos de un trazo, dos trazos, tres trazos y cuatro trazos, es palmaria. Debe destacarse que, con la excepción de los modelos de dos trazos, los modelos con un número impar de trazos son los más frecuentes.

Aunque los modelos incisos son, con mucho, los más abundantes, 26 de las fichas, es decir, un 4 por ciento del total, presentan impresiones circulares realizadas, en apariencia, punzando la arcilla con el extremo romo de un cálamo. Algunas de estas fichas con punciones llevan una sola impresión. Otras muestran un grupo de 6 marcas de punzón, dispuestas bien en una sola fila, bien en dos filas con tres impresiones cada una.

Por lo que respecta a los cambios en la forma en que se emplearon las fichas, es significativo el hecho de que 198 de las mismas, es decir, el 30 por ciento del total, estén perforadas. Estas fichas perforadas abarcan toda la gama de los tipos e incluyen los subtipos de la variedad sin marcas, con punciones y con incisiones. En efecto, ello quiere decir que se podía disponer de fichas de todo tipo, tanto en sus formas sin perforaciones como en las perforadas. Las perforaciones son tan reducidas que sólo un fino cordel podría haber pasado por las mismas. De entre las explicaciones que pueden imaginarse, una es la de que todos estos 15 tipos de fichas y sus 250 subtipos correspondientes no eran otra cosa que amuletos personales, que la gente de las ciudades de los primeros tiempos de la Edad del Bronce del Asia occidental llevaba, suspendidos de cordeles, en torno a su cuello o a su muñeca. Rechazo esta explicación por dos razones. En primer lugar, ninguna de las fichas perforadas que he examinado presenta rastro alguno de haberse empleado como amuleto, como puede ser el pulido o erosión en derredor del orificio del cordel por el propio uso. En segundo lugar, parece absurdo que todo este complicado repertorio de formas, tan difundido en su distribución geográfica y manufacturado con una uniformidad tan notable, haya servido de adorno personal, en el 30 por ciento de los casos, y para algún otro propósito, en el 70 por ciento restante.

Prefiero la hipótesis de que algunas fichas representativas de una transacción específica fueran ensartadas juntas, a modo de registro. Parece, al menos, plausible que la complejidad de guardar constancias en una economía urbana podría haber dado lugar a duplicar fichas idóneas para su enhebramiento.

El enhebramiento de fichas, si esto es lo que implican las fichas perforadas, sería sólo uno de los cambios en la forma en que estos simbólicos trozos de arcilla fueron empleados a finales del cuarto milenio a.C. Un cambio mucho más significativo lo constituye la primera aparición, en esta época, de las bullae de arcilla, o sobres, por así decir, como los que Amiet encontró como receptáculos de fichas en Susa. La existencia de una bulla representa un testimonio directo, perfectamente definido, del deseo del usuario de separar las fichas que representan una u otra transacción. Este sobre podía fabricarse con facilidad, presionando los dedos dentro de una pella de arcilla del tamaño de una pelota de tenis,

poco más o menos, creando así una oquedad lo bastante amplia como para que cupieran varias fichas; el sobre podía sellarse luego con un parche de arcilla.

A mi juicio, no existe duda alguna de que estas bullae fueron inventadas para proporcionar a las partes de una transacción un tipo de superficie tersa de arcilla que, según la costumbre sumeria, podía ser marcada con los sellos personales de los individuos implicados, a modo de validación del acto comercial. El hecho de que la mayoría de las 350 bullae descubiertas hasta el momento lleven impresiones de dos sellos diferentes, apoya mi convicción. Amiet ha sugerido que las bullae de Susa podían haber servido como conocimientos de embarque. Desde este punto de vista, un productor rural de, pongamos por caso, tejidos consignaría un flete de efectos a un intermediario urbano, enviándole junto con el flete una bulla con un número de fichas en su interior descriptivas del tipo y cantidad de la mercancía embarcada. Rompiendo la bulla, el destinatario del flete podía verificar la naturaleza del propio flete; además, la necesidad de entregar la bulla intacta evitaría al transportista la tentación de sisar la mercancía en tránsito. Esta transferencia sellada de fichas entre socios comerciales representa una forma completamente nueva de emplear el antiguo sistema de registro.

Esta innovación tenía un serio inconveniente. Los sellos impresos sobre el terso exterior de la bulla servían para dar validez a cada transmisión, pero, si estas improntas de los sellos tenían que conservarse, la bulla tenía que permanecer intacta. ¿Cómo, entonces, podría determinarse qué fichas, y en qué número, había en su interior? Pronto se encontró una solución al problema. La superficie de la bulla fue marcada, de forma que, además de las improntas de los sellos que le daban validez, llevaba imágenes de todas las fichas incluidas en su interior.

El ejemplo más chocante de esta práctica lo constituye una bulla que resultó contener seis fichas ovoides con surcos. Cada una de las seis fichas había sido presionada contra la superficie de la bulla, antes de ser introducida en la misma; aquéllas encajan exactamente con las improntas de la superficie de la bulla. Este medio de registrar en su exterior el contenido de una bulla no se practicó, sin embargo, de una forma universal. Sobre la mayoría de las bullae se hacía la impresión con el pulgar o con un cálamo; una impresión circular representaba una esfera o un disco, una impresión semicircular o triangular estaba por un cono, y así sucesivamente.

Está claro que no se inventaron estas marcas en la propia bulla para sustituir al sistema de fichas de contabilidad. No obstante, esto fue lo que ocurrió. Puede imaginarse muy bien el proceso. En primer lugar, la innovación tomó auge por su propia conveniencia; cualquiera podía "leer" qué fichas, y en qué número, contenía una bulla, sin destruir el envoltorio y sus improntas sigilares. Lo que sucedió después fue virtualmente inevitable y la sustitución de las propias fichas por sus representaciones bidimensionales habría sido, al parecer, el eslabón crucial entre el sistema de registro arcaico y la escritura. Las bullae huecas, con sus fichas en el interior, habrían sido reemplazadas por sólidos objetos de arcilla inscritos: las tablillas. Los montones de fichas en sartas, canastas y estantes de los archivos habrían cedido el paso a signos representativos de aquéllas, inscritos sobre tablillas, esto es, habrían cedido su lugar a documentos escritos.

El perfil convexo de las tablillas más antiguas de Uruk puede muy bien ser un rasgo morfológico heredado de las bullae esféricas. Lo mismo puede decirse, en su mayor parte, de la elección como superficie escriptoria de un material tan poco idóneo como la arcilla, medio blando y fácilmente emborronado, que debe secarse o cocerse, si debe ser conservado. Poca duda puede existir sobre la relación entre las formas y las marcas de las fichas y las pretendidas formas arbitrarias de muchos de los ideogramas de Uruk. No menos de 33 identificaciones bien definidas existen entre los ideogramas y las representaciones bidimensionales de las fichas y más del doble son posibles.

En resumen, los primeros ejemplos de escritura en Mesopotamia pueden no ser, como muchos han supuesto, el resultado de la pura invención. En vez de ello, constituyen, al parecer, una novedosa aplicación, a finales del cuarto milenio a.C., de un sistema de registro, que era nativo del Asia occidental, desde los primeros tiempos neolíticos en adelante. Desde esta perspectiva, la aparición de la escritura en Mesopotamia representa un paso lógico en la evolución de un sistema de contabilidad, que se originó hace unos 11.000 años.

Dentro de esta hipótesis, el hecho de que el sistema fuera empleado sin modificación relevante alguna hasta finales del cuarto milenio a.C. parece atribuible a las exigencias, relativamente sencillas, de la contabilidad de los 5000 años precedentes. Con el nacimiento de las ciudades y el desarrollo del comercio a gran escala, el sistema se vio impulsado hacia una nueva vía. Las imágenes de las fichas pronto suplantaron a las propias fichas y la evolución de los objetos simbólicos hacia los ideogramas condujo a la rápida adopción de la escritura por toda el Asia occidental.

Núcleos ligeros exóticos

Entre los elementos ligeros, los núcleos con desigual número de protones y de neutrones son altamente inestables. Algunos sobreviven sólo lo justo para ser detectados y presentan regímenes de desintegración radiactiva que no son usuales

Joseph Cerny y Arthur M. Poskanzer

En principio, los protones y los neutrones pueden agruparse en un gran número de combinaciones para formar los núcleos atómicos. Sin embargo, no existen los núcleos que constituyen la mayoría de estas combinaciones; aun cuando pudieran crearse, se desintegrarían demasiado de prisa para ser observados directamente. En conjunto se cree que unos 8000 núcleos son capaces de sobrevivir lo suficiente para que pueda considerarse que existen. De éstos, unos 300 son estables indefinidamente; se trata, por tanto, de los núcleos más comunes, y con gran diferencia, que se dan en la naturaleza. Se sabe que otros 1600 núcleos no son estables, sino que se desintegran por los distintos procedimientos agrupados bajo el término radiactividad. Quedan, pues, unos 6000 núcleos que deberían existir, pero que no se han descubierto.

Los núcleos que se han investigado de una manera más completa pertenecen a los elementos más ligeros, aproximadamente los 20 primeros de la tabla periódica. En esta región, los núcleos estables tienen, en general, igual número de protones que de neutrones y, como regla, se puede afirmar que cuanto más se separa un núcleo de esta igualdad, más corta se hace su vida media. Aquellos que están muy lejos de la estabilidad se denominan núcleos ligeros exóticos.

Tales núcleos exóticos no se observan hoy día entre los elementos naturales de la tierra; su vida media respectiva no llega, en bastantes casos, al segundo y, a veces, es mucho más breve. Los núcleos exóticos deben crearse en el laboratorio por bombardeo de núcleos estables con protones acelerados o con proyectiles más pesados. Incluso entonces, las cortas vidas medias impiden la investigación experimental, ya que toda la información que puede obtenerse acerca de un núcleo exótico debe recogerse en el fugaz intervalo que media desde su creación hasta su desintegración.

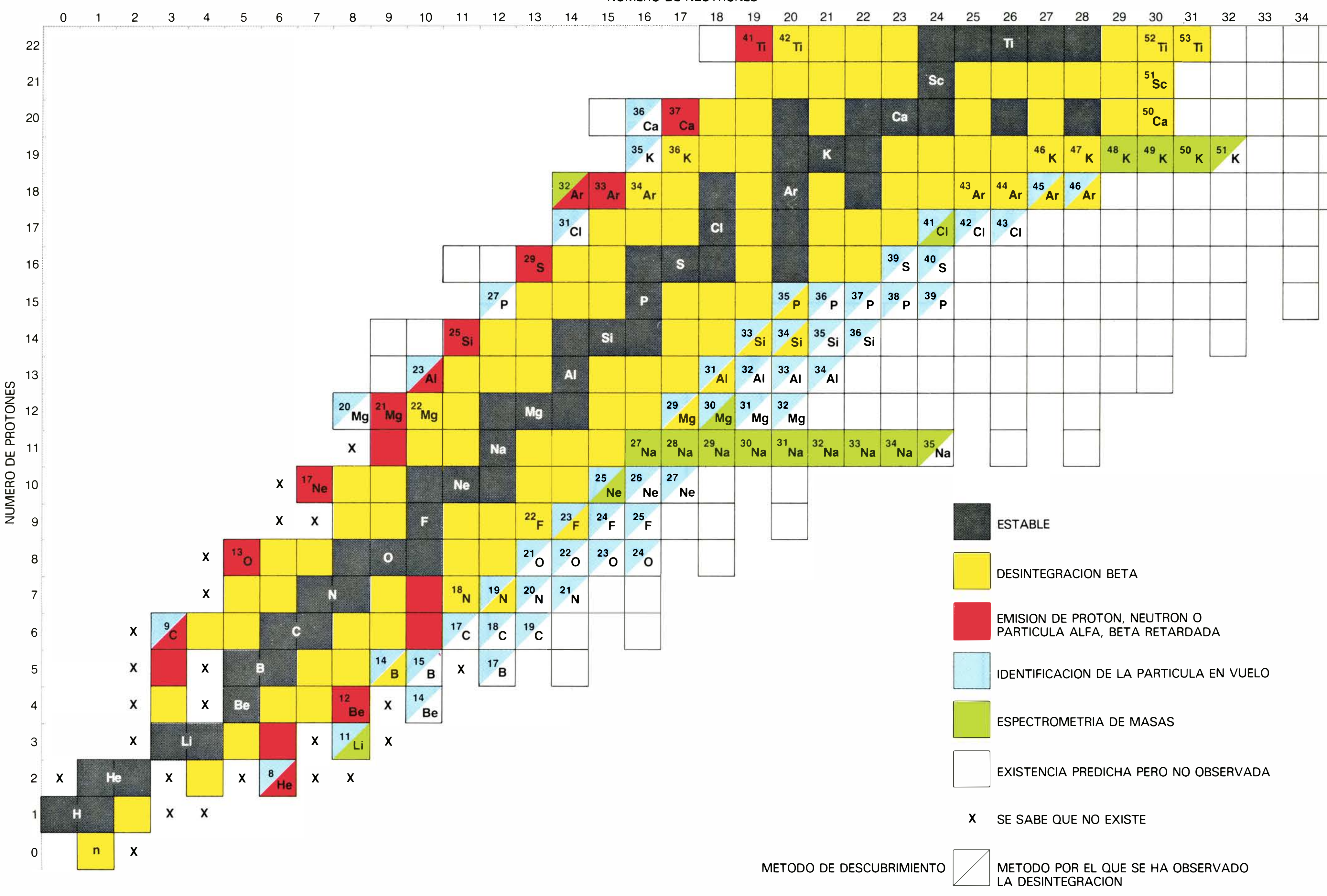
Entre los 20 elementos más ligeros (hasta el calcio en la tabla periódica) se han identificado unas 200 especies nucleares, de las cuales quizás un 40 por ciento puedan considerarse exóticas. Los cálculos teóricos sugieren que debería haber aproximadamente otros 110 isótopos de los elementos de esta región más alejados todavía de la estabilidad. En núcleos ligeros se logran con mayor facilidad razones extremas de protones y neutrones, sencillamente porque toda razón requiere un menor exceso numérico. Por esta causa, los elementos ligeros proporcionan una excelente oportunidad de explorar las propiedades de los núcleos exóticos, muchos de los cuales deben tener tamaños, formas y espectros de niveles energéticos fuera de lo corriente. Y no son pocos también los que presentan modos peculiares de desintegración radiactiva. Está ya en curso la investigación de esas desintegraciones no usuales.

Para identificar un núcleo es necesario especificar a la vez el número de protones y el número de neutrones. Por convención esto se hace corrientemente dando el número de protones (el número atómico) y dando también la suma de los números de protones y neutrones, cantidad que se denomina número másico. Cuando estos números se escriben con el símbolo de un elemento químico, el número másico aparece como superíndice y el número de protones como subíndice. (El número de protones suele omitirse ya que cada elemento corresponde a un único número de protones.) Así un núcleo de boro con cinco protones y cinco neutrones se indica con el símbolo $^{10}_{5}B$.

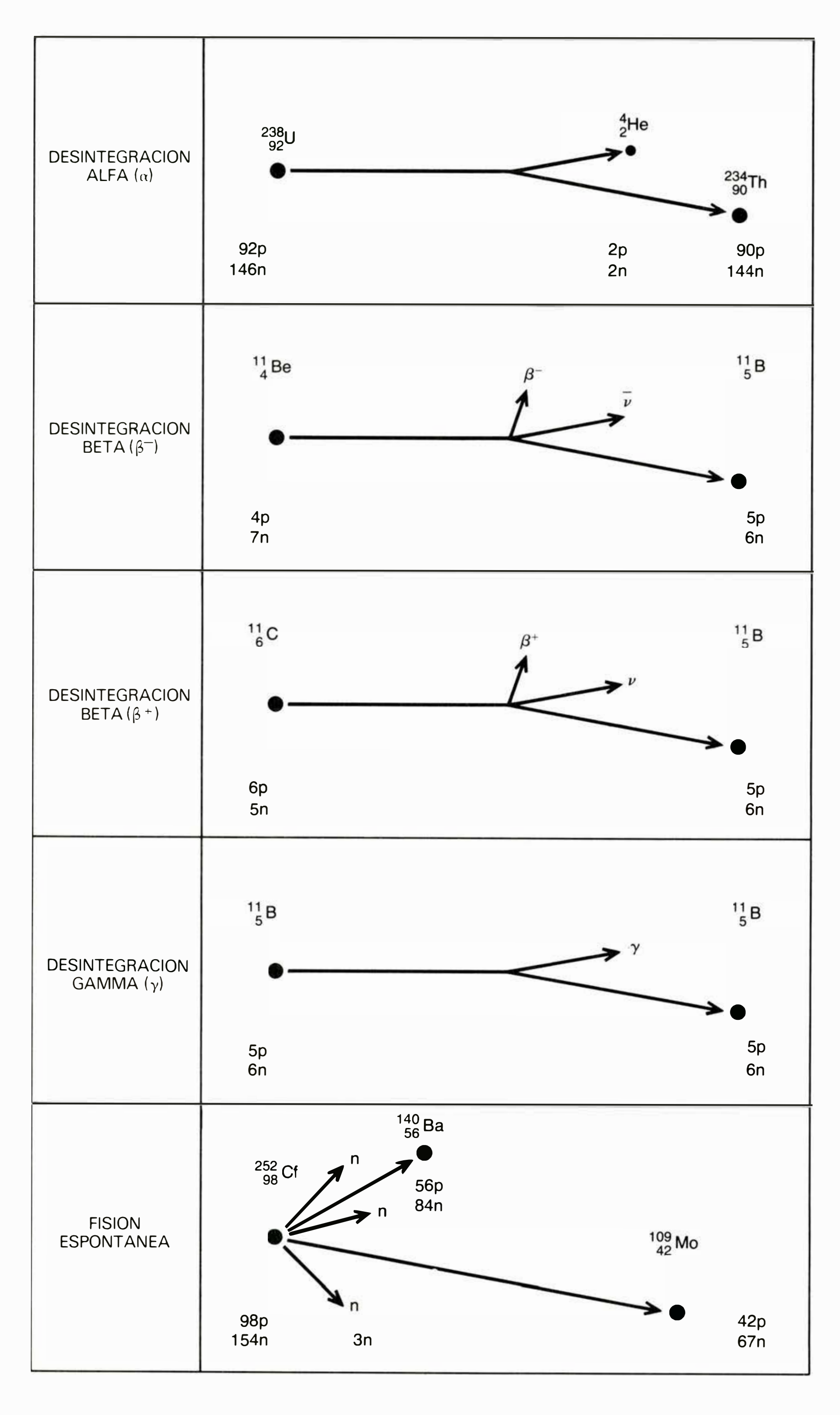
El protón y el neutrón difieren principalmente en sus propiedades eléctricas: el protón lleva una carga eléctrica positiva de una unidad y el neutrón es eléctricamente neutro. Las dos clases de partículas se conocen con el nombre genérico de nucleones. Como el número de protones determina la carga eléctrica del núcleo, también controla la configuración de la nube de electrones que lo rodea y, por tanto, las propiedades químicas del átomo. En consecuencia, el número de protones por sí solo determina la identidad de los elementos. Un núcleo con cinco protones es un núcleo de boro, independientemente de cuántos neutrones tenga. Los núcleos con el mismo número de protones, pero con distinto número de neutrones (y, por tanto, diferente número másico) se llaman isótopos. La búsqueda de núcleos ligeros exóticos es esencialmente una búsqueda de los isótopos más ligeros y más pesados de aquellos elementos que tienen número de protones comprendido entre uno y alrededor de 20.

Los núcleos sólo pueden existir si una agregación fuertemente ligada de varios nucleones tiene una masa menor que la suma de todas sus masas cuando dichos nucleones están aislados. La pequeña masa "que falta", o defecto de masa, es la energía de ligadura con que los nucleones se mantienen juntos. Como los electrones en un átomo, puede considerarse que los nucleones en un núcleo ocupan niveles energéticos discretos y bien definidos. El nivel más bajo puede acomodar dos nucleones; a medida que se añaden partículas adicionales, deben asignarse a niveles de energía progresivamente mayores. Un hecho importante de esta estructura energética es que pueden considerarse independientemente los niveles para los protones y para

TABLA DE LOS NUCLIDOS, en la página opuesta. Distribuye los núcleos según su composición; cada cuadrado representa una combinación única de protones y neutrones. El color de la parte superior de la mitad izquierda del cuadrado indica el método con el que se mostró que el núclido existía; el color de la parte inferior de la mitad derecha indica con qué método se observó su desintegración. Entre los elementos ligeros (aquí se muestran los 22 primeros), los núcleos más estables tienden a tener un número aproximadamente igual de protones y de neutrones. Los núcleos exóticos son aquellos que se separan sustancialmente de esta razón. Comprenden, a la vez, especies ricas en neutrones, las situadas en el borde derecho de la serie, y especies deficitarias en neutrones, situadas en el borde izquierdo. Los núclidos con índices dentro de su cuadrado han sido descubiertos desde 1961, cuando se hizo una de las tablas globales de los núclidos.



NUMERO DE NEUTRONES
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34
NUMERO DE PROTONES
22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
41 Ti 42 Ti Ti 52 Ti 53 Ti
Sc 51 Sc
36 Ca 37 Ca Ca 50 Ca
35 K 36 K K 46 K 47 K 48 K 49 K 50 K 51 K
32 Ar 33 Ar 34 Ar Ar 43 Ar 44 Ar 45 Ar 46 Ar
31 Cl Cl 41 Cl 42 Cl 43 Cl
29 S S 39 S 40 S
27 P P 35 P 36 P 37 P 38 P 39 P
25 Si Si 33 Si 34 Si 35 Si 36 Si
23 Al Al 31 Al 32 Al 33 Al 34 Al
20 Mg 21 Mg 22 Mg Mg 29 Mg 30 Mg 31 Mg 32 Mg
X Na 27 Na 28 Na 29 Na 30 Na 31 Na 32 Na 33 Na 34 Na 35 Na
X 17 Ne Ne 25 Ne 26 Ne 27 Ne
X X F 22 F 23 F 24 F 25 F
X 13 O O 21 O 22 O 23 O 24 O
X N 18 N 19 N 20 N 21 N
X 9 C C 17 C 18 C 19 C
X X B 14 B 15 B X 17 B
X X Be 12 Be X 14 Be
X Li X 11 Li X
X He X X 8 He X X
H X X
n X
ESTABLE
DESINTEGRACION BETA
EMISION DE PROTON, NEUTRON O PARTICULA ALFA, BETA RETARDADA
IDENTIFICACION DE LA PARTICULA EN VUELO
ESPECTROMETRIA DE MASAS
EXISTENCIA PREDICHA PERO NO OBSERVADA
X SE SABE QUE NO EXISTE
METODO DE DESCUBRIMIENTO
METODO POR EL QUE SE HA OBSERVADO LA DESINTEGRACION



LA DESINTEGRACION RADIACTIVA transforma un núcleo en una configuración más estable de menor energía. Desde hace tiempo se conocen cuatro modos de desintegración: emisión alfa, beta y gamma y fisión espontánea; todos, a excepción de la emisión gamma, convierten un elemento químico en otro. La desintegración alfa y la fisión espontánea se dan predominantemente en los núcleos pesados. Hay dos clases de desintegración beta. En la emisión β^- se libera un electrón y un antineutrino cuando un neutrón del núcleo se convierte en un protón; en la desintegración β^+ las partículas emitidas son un positrón (un electrón positivo) y un neutrino cuando un protón del núcleo se convierte en un neutrón. El neutrino y el antineutrino son partículas neutras sin masa, con una interacción extraordinariamente débil con los núcleos. En la desintegración gamma no cambia la composición del núcleo; sólo se altera el nivel energético. El rayo gamma emitido es un fotón, o cuanto de energía electromagnética, de alta energía. Algunos núcleos exóticos tienen modos de desintegración más complicados. Característica de las desintegraciones es que la masa total de los productos resulta menor que la masa del núcleo padre; esta reducción de la masa hace posible la desintegración.

los neutrones. Así, en un núcleo de helio-4 ($^{4}_{2}He$), los dos protones pueden ocupar el nivel de menor energía, y lo mismo pueden hacer los dos neutrones. Si los cuatro fuesen protones, dos deberían ocupar un nivel energético más elevado, obteniéndose un núcleo de masa mayor. Entre los núcleos ligeros, los dotados de igual número de protones y neutrones tienden a ser los más estables.

Si el equilibrio entre el número de protones y de neutrones fuese lo único que influyese en la estabilidad nuclear, todos los núcleos estables tendrían aproximadamente igual número de protones y neutrones. La realidad es que hay otro factor que se hace más importante a medida que el número de protones aumenta: la creciente repulsión electrostática entre los protones, que también hace disminuir la energía de enlace del núcleo. En consecuencia, los núcleos muy pesados tienden a ser más estables cuando tienen un exceso de neutrones: el isótopo del uranio de vida más larga, por ejemplo, $^{238}_{92}U$ tiene aproximadamente 1,6 veces más neutrones que protones.

La estabilidad relativa de los núclidos puede observarse fácilmente en un gráfico que presente el defecto de masa por nucleón para cada uno de los núclidos. Aquellos núcleos con el mayor defecto de masa, y, por tanto, con la mayor energía de enlace, forman un "valle de estabilidad". En los elementos ligeros, el valle corre entre los núclidos que posean aproximadamente igual número de protones y neutrones; después, entre los más pesados, se curva hacia especies nucleares que son progresivamente más ricas en neutrones. A uno y otro lado del valle los núcleos menos estables tienen un defecto de masa menor y forman pronunciadas laderas. Los núcleos exóticos ocupan las partes altas de las laderas del valle, la rica en neutrones y la deficitaria.

La razón de protones y neutrones y el número absoluto de protones determinan las principales características del valle de estabilidad. Hay otro factor que influye también en la estabilidad nuclear que no puede olvidarse: los núclidos con un número par de protones o de neutrones, o de ambos, tienen una estabilidad ligeramente más elevada. Este pequeño aumento se hace particularmente importante entre los núcleos ligeros exóticos, donde a veces es posible añadir dos nucleones a un núcleo para crear una nueva especie, aunque el núclido intermedio con un nucleón extra no existe.

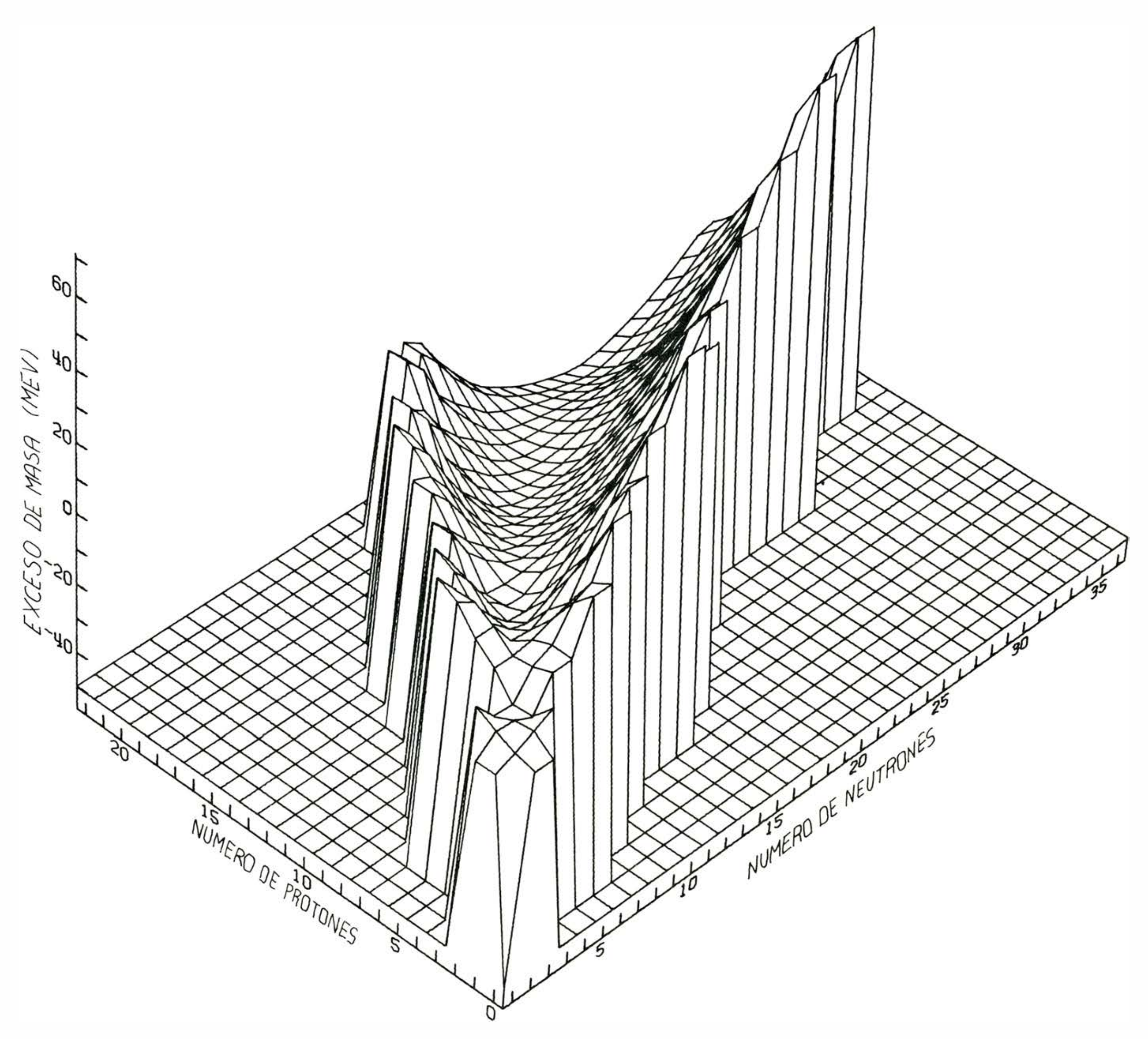
Debe también indicarse que todos los nucleones no siempre ocupan el nivel energético más bajo posible. Cuando un nucleón, o varios de ellos, se encuentran en un nivel energético más alto, se dice que el núcleo se halla en un estado excitado. El

estado excitado debe tener, obviamente, el mismo número de protones y neutrones que el correspondiente estado fundamental, pero puede diferir en tamaño y forma. El estado excitado puede diferir también en momento angular: cada nucleón tiene un espín intrínseco igual a 1/2 cuando se mide en unidades naturales, y en el núcleo los nucleones también pueden tener momento angular orbital, reflejo de su estado de movimiento, que siempre debe tomar valores enteros (de nuevo en unidades naturales). Estas cantidades deben sumarse o restarse, de acuerdo con la orientación de los momentos, para dar el momento angular total del núcleo.

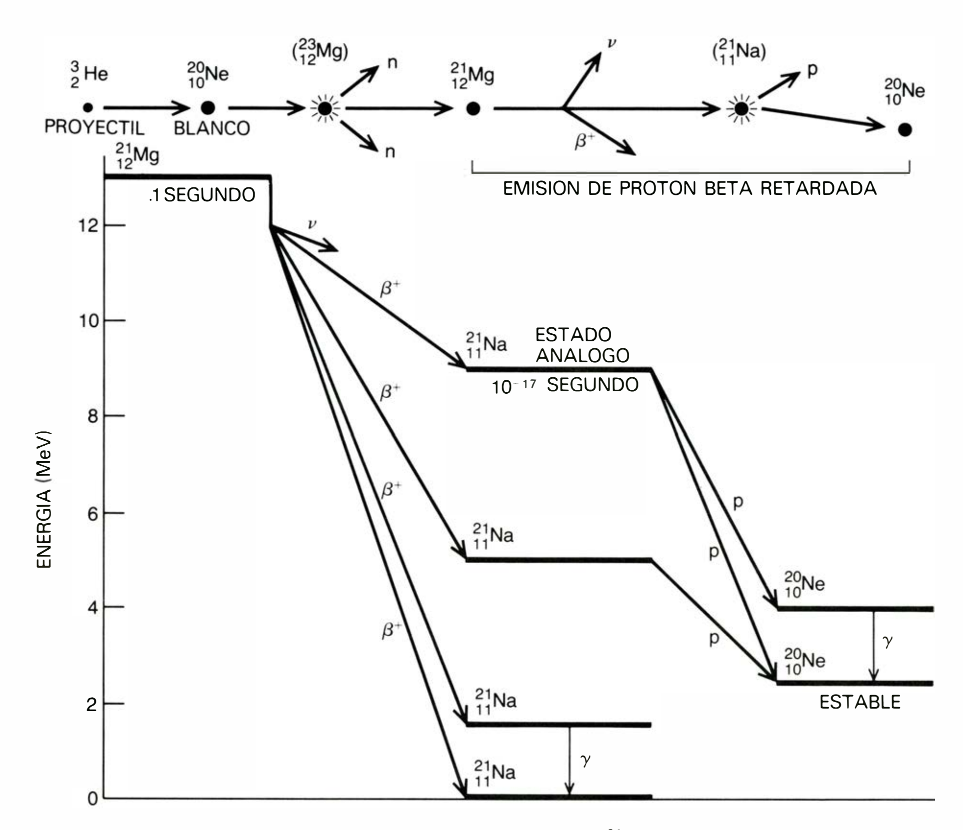
Cualquier núclido que tenga un defecto de masa pequeño o una pequeña energía de enlace, tiende a desintegrarse en núcleos situados más abajo en la ladera hacia la estabilidad. Desde hace tiempo se han distinguido tres modos de desintegración radiactiva que convierten un elemento en otro: desintegración alfa, desintegración beta y fisión espontánea. Se han observado, entre los núcleos exóticos, otros varios modos de desintegración más; asimismo, se han predicho algunos esquemas de desintegración nuevos.

La desintegración alfa es la emisión de un núcleo de helio ($^{4}_{2}$He). Cuando el uranio 238 expulsa una partícula alfa, el $^{238}_{92}$U se convierte en el isótopo del torio $^{234}_{90}$Th. La diferencia entre la masa del $^{238}_{92}$U y la masa total del $^{234}_{90}$Th más la del $^{4}_{2}$He es equivalente a una energía de unos cuatro millones de electrón voltios (MeV), que aparece principalmente como energía cinética de la partícula alfa.

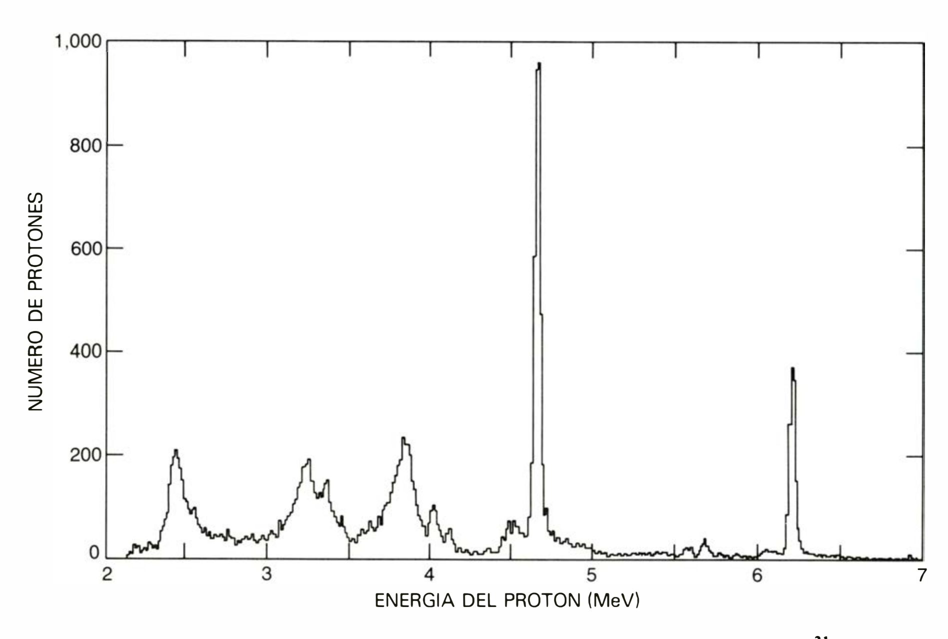
Entre los núcleos ligeros el modo más común de desintegración radiactiva es la desintegración beta, que presenta dos formas. En la desintegración β^- un neutrón del núcleo se convierte en un protón y se emiten dos partículas: un electrón y un antineutrino. En la desintegración β^+ un protón del núcleo se convierte en un neutrón y las partículas emitidas son un positrón y un neutrino. En ninguno de los dos casos cambia el número total de nucleones,



VALLE DE ESTABILIDAD, ocupado por los núclidos que tienen la mínima masa y son estables. El valle se representa señalando el "exceso de masa" de cada núclido. El exceso de masa está relacionado con el defecto en la energía de enlace, asignado a un núclido de referencia un exceso de masa cero: el isótopo del carbono con número másico 12 ($^{12}_{6}$C). Los núcleos de las laderas que se elevan del valle pueden reducir su exceso de masa desintegrándose en unos núclidos más estables. Los núcleos exóticos, que ocupan las partes altas de las laderas, a ambos lados del valle, tienen el máximo exceso de masa y suelen ser los que se desintegran más de prisa. La gráfica fue construida, con la ayuda de un ordenador electrónico, por Jef Poskanzer, hijo de uno de los autores.



EL ISOTOPO DEFICITARIO DE NEUTRONES del magnesio, $^{21}_{12}$Mg, se desintegra a veces por el proceso no usual de emisión de protón y partícula beta retardada. Se prepara el isótopo bombardeando átomos de neón con iones acelerados de helio 3. El núcleo formado está muy excitado y se desintegra emitiendo dos neutrones para dar $^{21}_{12}$Mg. Este núcleo se desintegra a su vez, por emisión β^+; el producto es un isótopo del sodio, $^{21}_{11}$Na. El isótopo del sodio se crea frecuentemente en el estado fundamental o en un estado poco excitado, que puede desintegrarse por emisión gamma en el estado fundamental. Sin embargo, cuando se forma en un estado muy excitado, rápidamente expulsa un protón dando el isótopo estable del neón, $^{20}_{10}$Ne. Debido a que el estado excitado del núcleo $^{21}_{11}$Na se desintegra casi instantáneamente, todo el proceso puede contemplarse como una desintegración en dos etapas del $^{21}_{12}$Mg. Una desintegración beta muy favorecida tiene lugar entre el $^{21}_{12}$Mg y un estado del $^{21}_{11}$Na llamado el estado análogo; en éste los nucleones tienen los mismos movimientos relativos que en el estado padre, con la salvedad de que un protón ha pasado a neutrón.



ESPECTRO DE ENERGIA de los protones emitidos en la desintegración de los núcleos de $^{21}_{12}$Mg. Comprende unos cuantos picos anchos y dos picos estrechos. Los picos estrechos se hallan a energías de 4,7 y 6,2 millones de electrón voltios (MeV) y provienen de una desintegración beta muy favorecida entre el $^{21}_{12}$Mg padre y su estado análogo en el $^{21}_{11}$Na hijo. Hay dos grupos porque en la desintegración del estado análogo se encuentran ocupados tanto el estado fundamental como el primer estado excitado del núcleo de $^{20}_{10}$Na. Los grupos de protones están netamente definidos porque los protones emitidos en el proceso de desintegración poseen una energía delimitada. Por esta razón, los protones proporcionan más información acerca del núcleo que los positrones de la desintegración beta inicial. Los positrones tienen un espectro de energía continuo: la energía de desintegración beta puede repartirse de cualquier modo entre el positrón y el neutrino.

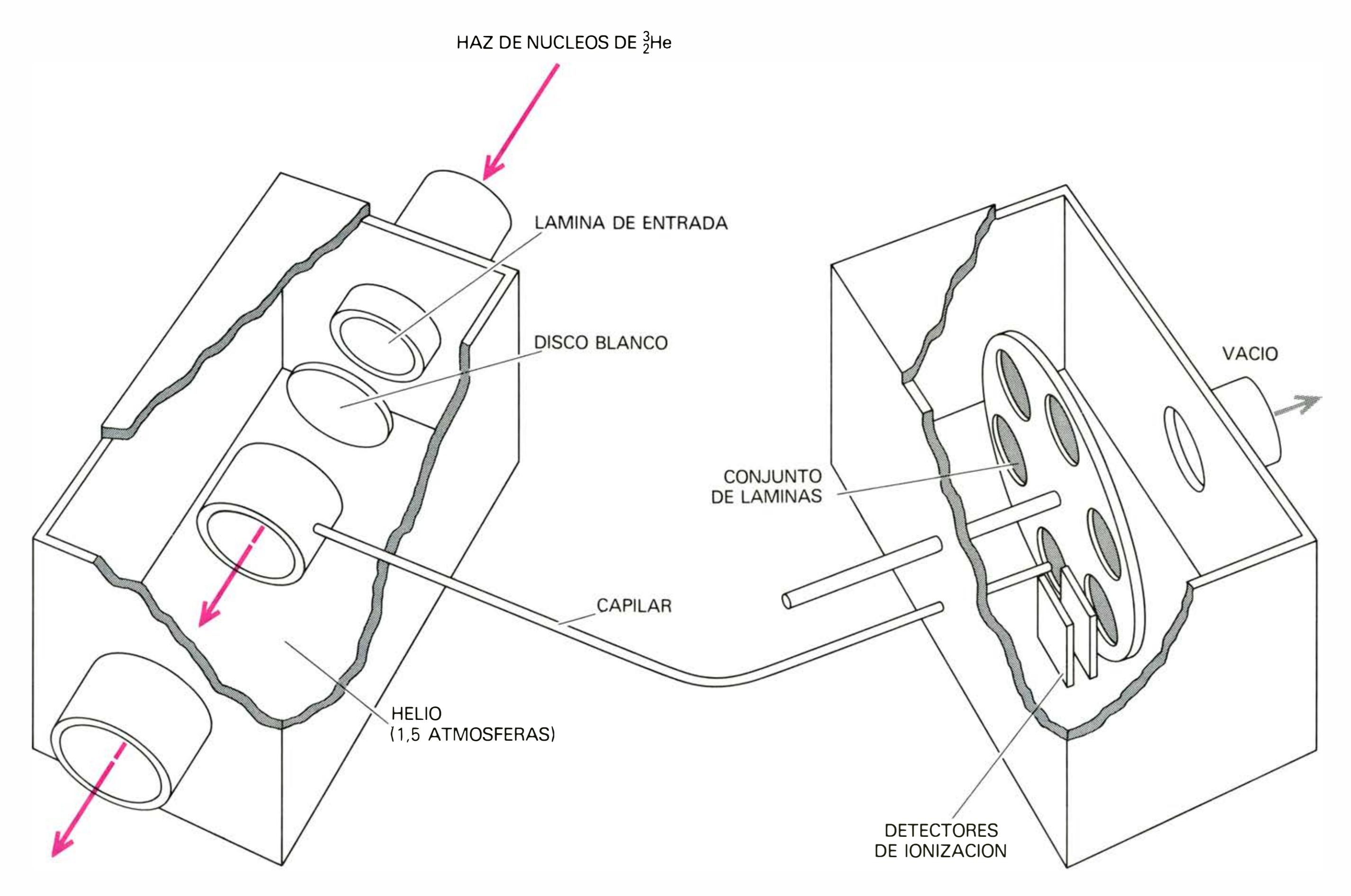
pero se alteran el balance de protones y neutrones y la identidad química del núcleo. Por ejemplo, el isótopo del carbono $^{11}_{6}$C, deficitario en neutrones, se desintegra por emisión β^+: un protón se cambia en un neutrón dando el núclido hijo estable $^{11}_{5}$B. De manera similar el $^{11}_{4}$Be, un isótopo del berilio rico en neutrones, se desintegra por emisión β^-, dando también $^{11}_{5}$B.

La fisión espontánea es posible siempre que un núcleo pueda desdoblarse en dos núclidos hijos que tengan una masa total menor que el núclido padre. El californio 252 puede desintegrarse por fisión espontánea para dar, por ejemplo, un núcleo de molibdeno y un núcleo de bario, acompañados usualmente de unos pocos neutrones libres. Los productos de la fisión son, a su vez, inestables y están sujetos a subsiguientes desintegraciones; pero en todos los casos, la suma de sus masas es menor que la masa del núcleo padre $^{252}_{98}$Cf. (La energía desprendida de esta manera aparece como energía cinética de los fragmentos de la fisión.)

Hay otra forma corriente de desintegración radiactiva en la que la identidad química del núcleo no cambia: de hecho, ni el número de protones ni el número de neutrones se altera. Se trata de la emisión gamma y afecta sólo al estado energético del núcleo. El rayo gamma es un fotón, o cuanto de radiación electromagnética, de alta energía. La energía del rayo gamma es igual a la diferencia de masa entre el estado padre y el estado hijo. Muchos productos de las desintegraciones radiactivas se forman en estados excitados, y así a la desintegración alfa o beta suele seguir inmediatamente la emisión gamma.

El ritmo de la desintegración radiactiva se expresa corrientemente en términos de la vida media: el tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los átomos de una determinada especie. Los tiempos típicos observados en la desintegración beta van desde unos 10^{-3} segundos hasta más de 10^{5} años; incluso la mínima vida media resulta comparativamente larga en el mundo de los sucesos subatómicos. Esta lentitud se debe principalmente a la debilidad del proceso fundamental que, en el interior del núcleo, convierte una clase de nucleón en la otra. Otros sucesos nucleares, que no implican una tal transformación, tienen lugar mucho más de prisa. De particular importancia, en el estudio de los núcleos exóticos, es la emisión espontánea de un nucleón.

Un núclido es susceptible de desintegrarse emitiendo un protón o un neutrón, siempre que la masa del padre sea mayor que la suma de las masas del núclido hijo y del nucleón emitido. El tiempo mínimo necesario para esta desintegración se cal-



UN CHORRO DE HELIO se emplea para transportar núcleos emisores de protones y partículas beta retardadas desde el blanco de un acelerador a un detector en los pocos cientos de milisegundos disponibles antes de que se hayan desintegrado la mayoría de los núcleos. El blanco se encierra en una vasija que contiene helio a aproximadamente 1,5 atmósferas. Los núcleos producidos en las reacciones con el haz de $^{3}_{2}$He acelerados retroceden del blanco; quedan entonces rodeados por el chorro de helio, el cual los arrastra a través de un tubo capilar a otra vasija, que se vacía continuamente. En el caso particular de la producción del $^{21}_{12}$Mg se retiró el blanco sólido y se mezcló el gas $^{20}_{10}$Na con el helio. En la segunda vasija los núcleos se depositan en una serie de láminas, que rápidamente se llevan frente a un par de detectores sensibles a las partículas que están cargadas eléctricamente. Estos detectores miden la energía de los protones.

cula fácilmente: no es más que el tiempo necesario para que un nucleón que se mueva a una velocidad típica de 10^9 centímetros por segundo atraviese el núcleo, que usualmente tiene un diámetro de 10^{-13} o 10^{-12} centímetros. Este tiempo es del orden de 10^{-21} o 10^{-22} segundos. La existencia de varias barreras inhibidoras puede aumentar este tipo sustancialmente, pero sólo en casos excepcionales superará los 10^{-16} segundos.

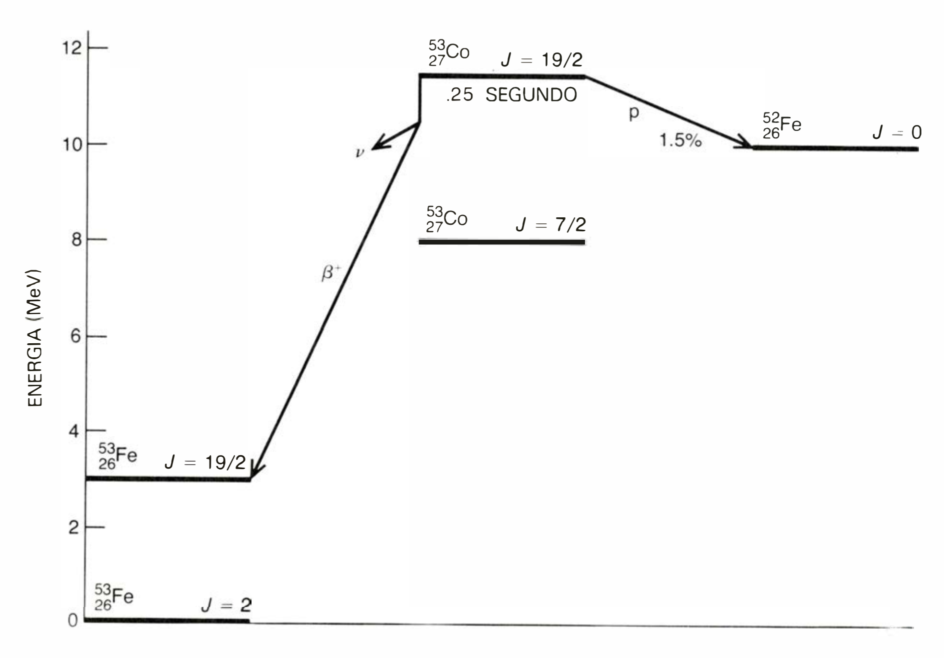
El enorme intervalo entre la vida media típica de la desintegración beta (10^{-3} segundos o más) y la de la emisión rápida de un nucleón (10^{-16} segundos o menos) proporciona una delimitación experimental conveniente para separar aquellos núclidos que puede considerarse que existen de los que no. Es posible calcular teóricamente qué núclidos no presentan emisión rápida de un nucleón y según este criterio deben existir y los que no. Un tal conjunto de predicciones fue realizado por Gerald T. Garvey e I. Kelson, cuando estaban en la Universidad de Yale. Su método consistió en calcular la masa de un núclido no observado extrapolando a partir de aquellas de núclidos conocidos en el contexto del modelo nuclear de la partícula independiente.

Los límites de estabilidad predichos frente a la emisión rápida de un nucleón y los actuales límites experimentales pueden ilustrarse mediante los isótopos del boro, elemento que tiene dos isótopos estables, $^{10}_{5}$B y $^{11}_{5}$B. Entre los isótopos más ligeros del boro se sabe que $^{9}_{5}$B es inestable por emisión extraordinariamente rápida de un protón y, por tanto, no existe. Sin embargo, el isótopo que posee un neutrón menos $^{8}_{5}$B existe: se desintegra por emisión β^+ con una vida media de 0,8 segundos. En el otro lado del valle de estabilidad se han observado cinco isótopos del boro ricos en neutrones, siendo el más pesado el $^{17}_{5}$B, que se espera se desintegre por emisión β^-, aunque su vida media no se ha medido. No se espera que exista el isótopo $^{18}_{5}$B, pero los cálculos sugieren que el $^{19}_{5}$B debe ser estable frente a la emisión de un neutrón. Todavía no se ha detectado.

Un mapa de los núclidos conocidos y predichos revela varias características generales de su distribución. La nota más prominente es que el número de isótopos aumenta drásticamente al crecer el número atómico. El hidrógeno (número atómico 1) tiene tres isótopos; el sodio (número atómico 11) tiene 16 isótopos conocidos y otros dos predichos; el calcio (número atómico 20) se espera que tenga 31.

Otra característica general de la distribución de núclidos es que de todos los elementos hay más isótopos ricos en neutrones que deficitarios. Este efecto es otra consecuencia de la carga eléctrica del protón. La adición de un protón a un núcleo que ya tiene déficit de neutrones no sólo aumenta el desequilibrio entre protones y neutrones, sino que crece también la repulsión electrostática entre los protones. Sin embargo, añadiendo un neutrón a una especie rica en neutrones sólo se afecta al balance entre tipos de nucleones.

La región de mayor interés en el estudio de los núcleos ligeros exóticos es la que se encuentra entre los núcleos que se desintegran por emisión beta convencional y aquellos que son inestables por emisión rápida de un nucleón. De los núcleos de este tipo que son deficitarios en neutrones varios se desintegran por un proceso de dos etapas llamado emisión consecutiva de una



LA RADIACTIVIDAD PROTONICA se ha observado en un estado excitado de larga vida de un isótopo del cobalto deficitario en neutrones: $^{53}_{27}$Co. Con gran diferencia, el modo de desintegración más normal de este estado excitado es la emisión beta convencional dando $^{53}_{26}$Fe; aproximadamente un 1,5 por ciento de las veces, sin embargo, el núcleo de cobalto simplemente expulsa un protón para dar el isótopo del hierro $^{52}_{26}$Fe. Debe destacarse la vida media del núclido. La mayoría de los núcleos que se desintegran por emisión directa de un protón o un neutrón lo hacen muy rápidamente, verbigracia, en 10^{-21} segundos. Pero el cobalto 53 tiene una vida media de 0,25 segundos y, si la radiactividad protónica fuera su único modo de desintegración, sobreviviría unos 17 segundos. El símbolo *J* representa el momento angular intrínseco de los núclidos.

partícula beta y de un protón (también emisión de protón beta retardada).

Un ejemplo de tal núclido es el $^{21}_{12}$Mg, que tiene tres neutrones menos que el isótopo estable más ligero del magnesio, $^{24}_{12}$Mg. A causa de su déficit de neutrones, el $^{21}_{12}$Mg es altamente inestable: se desintegra con una vida media de 0,12 segundos por emisión β^+, dando el núcleo $^{21}_{11}$Na. En su estado fundamental el $^{21}_{11}$Na también se desintegra por el modo convencional de emisión β^+, pero los núcleos formados por la desintegración del isótopo del magnesio no están sólo en el estado fundamental sino también en muchos estados excitados. Basta la energía adicional de excitación para hacer que el núcleo de $^{21}_{11}$Na sea inestable por emisión rápida de un protón, dando como núclido nieto el isótopo estable del neón, $^{20}_{10}$Ne. Para el observador esta desintegración secuencial aparece esencialmente como la emisión simultánea de un positrón y un protón. (El neutrino que también se emite no puede detectarse.)

En el análisis de estos sucesos, el protón producido en la desintegración secundaria lleva más información que los positrones primarios, debido a que los protones emitidos en las desintegraciones de cada nivel de energía tienen una energía definida. En la desintegración beta, la energía disponible puede repartirse de cualquier manera entre el positrón y el neutrino. A partir del espectro del protón, es posible deducir qué estados del núcleo de $^{21}_{11}$Na se han ocupado. No todas las desintegraciones beta, sin embargo, dejan el núcleo en un estado que pueda desintegrarse por emisión de un protón; el resto vuelve al estado fundamental del $^{21}_{11}$Na por emisión gamma. Los rayos gamma tienen también energías definidas (iguales a la diferencia de energía entre la energía del estado excitado y la del estado fundamental), y pueden llevar información sobre la ocupación de los estados.

La emisión consecutiva de una partícula beta y de un protón se observó por primera vez en 1963 por V. A. Karnaukhov, G. M. Ter-Akopian y V. G. Subbotin, del Instituto de Investigación Nuclear de Dubna, cerca de Moscú, y por Richard D. Barton, Ross McPherson, Robert E. Bell, William R. Frisken, William T. Link y Robert B. Moore, de la Universidad McGill de Montreal. Muchos núcleos ligeros que se desintegran de esta manera han sido identificados desde entonces, principalmente por el trabajo de tres grupos de investigadores: uno dirigido por John C. Hardy, de McGill, otro en el que se encuentra uno de nosotros (Poskanzer), a la sazón en el Brookhaven National Laboratory, y más recientemente un tercer grupo en el que se encuadra el otro autor (Cerny), en el Lawrence Berkeley Laboratory, de la Universidad de California. Los diez núcleos más ligeros en los que se ha observado esta desintegración secuencial, que empiezan con el isótopo del carbono $^{9}_{6}$C y continúan hasta el isótopo del titanio $^{41}_{22}$Ti, tienen vidas medias que van desde nueve hasta 470 milisegundos.

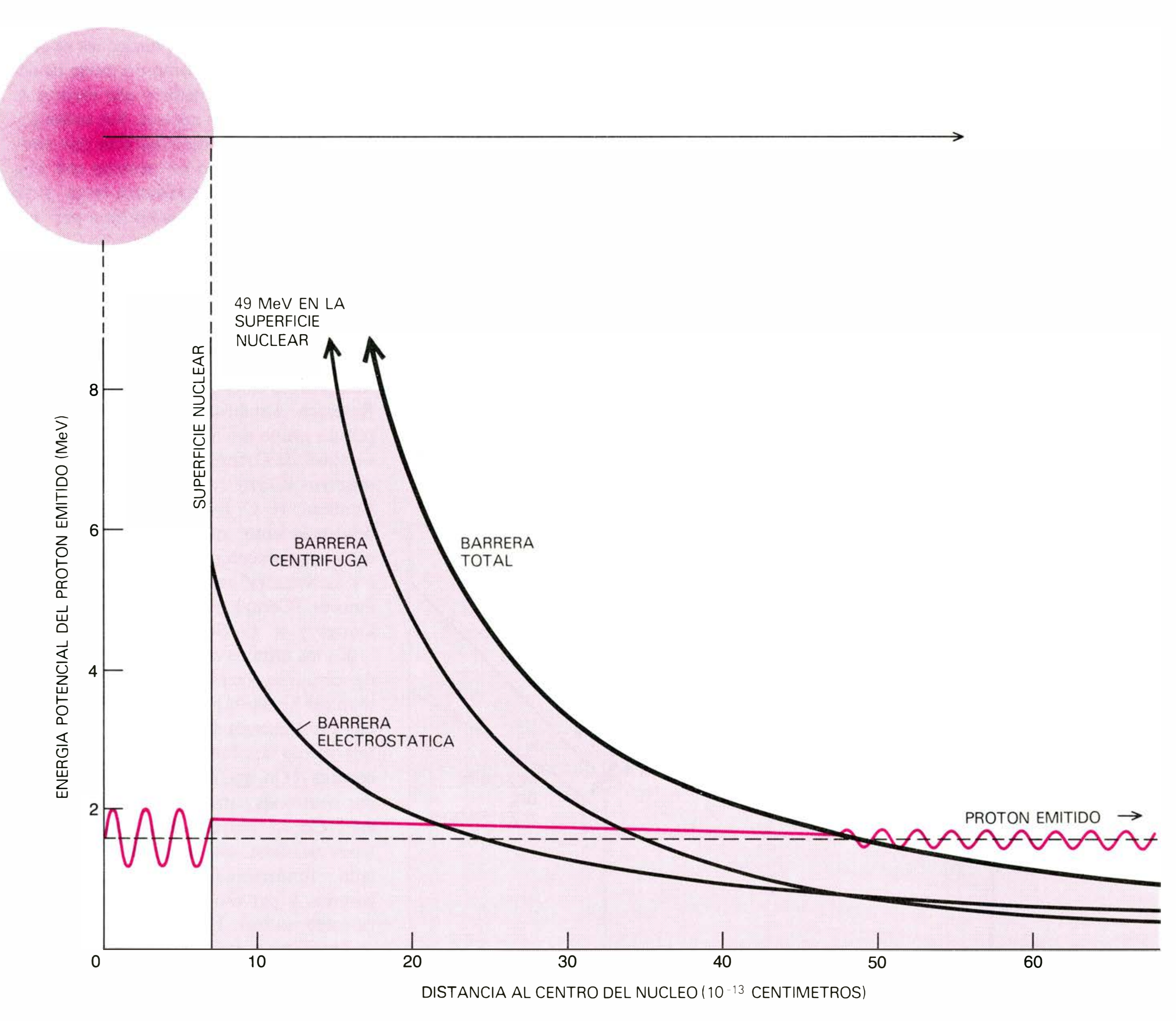
El núclido $^{21}_{12}$Mg se produjo empleando como blanco del acelerador un gas que contenía átomos de $^{20}_{10}$Ne. (Como este núclido es también el producto final de la desintegración secuencial, el conjunto de la reacción es cíclico.) El gas fue bombardeado por núcleos del isótopo $^{3}_{2}$He, deficitario en neutrones, que habían sido acelerados a una energía de 30 MeV. En alguna de estas interacciones los dos núcleos se fusionaban, formando $^{23}_{12}$Mg en un estado altamente excitado. Una fracción de los núcleos excitados rápidamente expulsaban dos neutrones para formar $^{21}_{12}$Mg.

A causa de la corta vida media de este isótopo (0,12 segundos) y de otros emisores consecutivos de una partícula beta y de un protón, se precisan medios especiales para transportar el núclido desde el área del blanco del acelerador al aparato empleado para detectar su desintegración. En En los primeros estudios de los isótopos artificiales, el medio de transporte era algunas veces una persona que llevaba la muestra a mano de una habitación a otra. Cuando el interés se desplazó a los núcleos con vidas medias más cortas, se empleó a menudo una lanzadera neumática o "conejo". Para estudios de los emisores consecutivos de una partícula beta y de un protón este método resulta también demasiado lento. Los núcleos de $^{21}_{12}$Mg fueron llevados al detector por un chorro de helio. Los núcleos de neón del blanco estaban mezclados con un gran volumen de helio gas a 1,5 atmósferas. Los núcleos producidos fueron rodeados por el helio y arrastrados a través de un tubo capilar a otra vasija que se vaciaba continuamente mediante una bomba de alta velocidad. Allí se despositaban los núcleos de magnesio (y otros) en delgadas láminas que se hacían avanzar varias veces cada segundo hacia el detector.

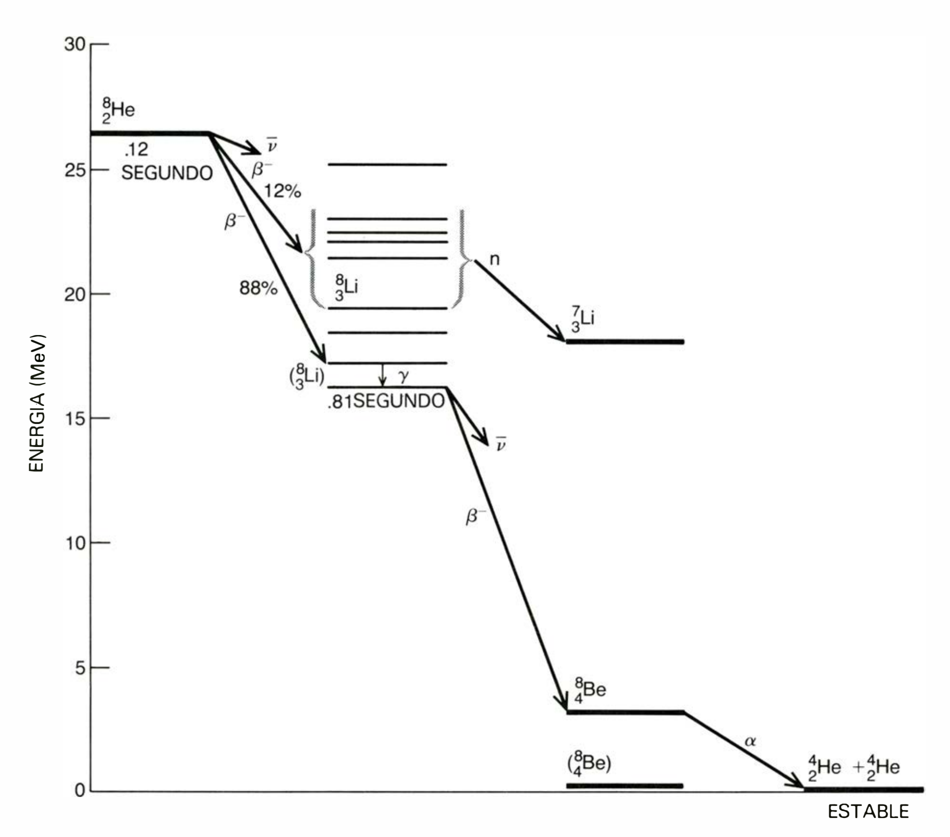
Los núcleos de $^{21}_{12}$Mg no eran las únicas especies radiactivas que se formaban en esta reacción; en realidad eran una pequeña minoría. La mayoría de los núclidos se desintegraban por emisión β^+ o β^-, de manera que el detector debía identificar un pequeño flujo de protones en un fondo intenso de electrones y positrones. En general, los detectores de partículas son dispositivos sensibles a la ionización de los átomos provocada por el paso de una partícula cargada. Positrones, electrones y protones, tienen todos una carga eléctrica, pero como el protón es mucho más pesado puede identificarse. Los protones pierden energía más rápidamente a medida que atraviesan la materia; haciendo que las partículas emitidas pasen a través de dos detectores en serie, puede medirse el ritmo de pérdida de energía.

La desintegración de una muestra de magnesio 21 produce muchos protones, que pueden repartirse en grupos según sus energías. Cada uno de los grupos representa sucesos de desintegración a un nivel energético determinado en el núcleo hijo intermedio, $^{21}_{11}$Na. Se produce un grupo particularmente interesante de protones en una transición favorecida entre el núcleo padre y un nivel de energía en la especie hija que se llama el estado análogo del padre. El concepto de estado análogo se funda en la teoría de la independencia de la carga de las fuerzas nucleares. Esta teoría mantiene que si las fuerzas electromagnéticas pueden despreciarse, la interacción entre un protón y un protón, entre un protón y un neutrón y entre un neutrón y un neutrón, deben ser todas la misma. Por tanto, si dos núcleos tienen el mismo número de nucleones, y estos nucleones se hallan en el mismo estado de movimiento, entonces los dos núcleos deben ser idénticos, aun cuando sus nucleones se distribuyan diferentemente entre protones y neutrones. En este caso, ambos núcleos tienen 21 nucleones, y la teoría de la independencia de la carga predice que tienen el mismo movimiento en el estado excitado favorecido del $^{21}_{12}$Na que el que tiene en el estado fundamental del $^{21}_{12}$Mg. La realidad es que las interacciones electromagnéticas no pueden despreciarse completamente y deben observarse pequeñas diferencias entre los estados de los núcleos. La importancia de las diferencias puede determinarse estudiando el espectro de protones. Para el $^{21}_{12}$Mg y para otros varios emisores consecutivos de una partícula beta y de un protón se ha encontrado que las discrepancias son bastante pequeñas; el estado análogo y el núcleo padre se parecen mucho entre sí, típicamente en un 90 por ciento.

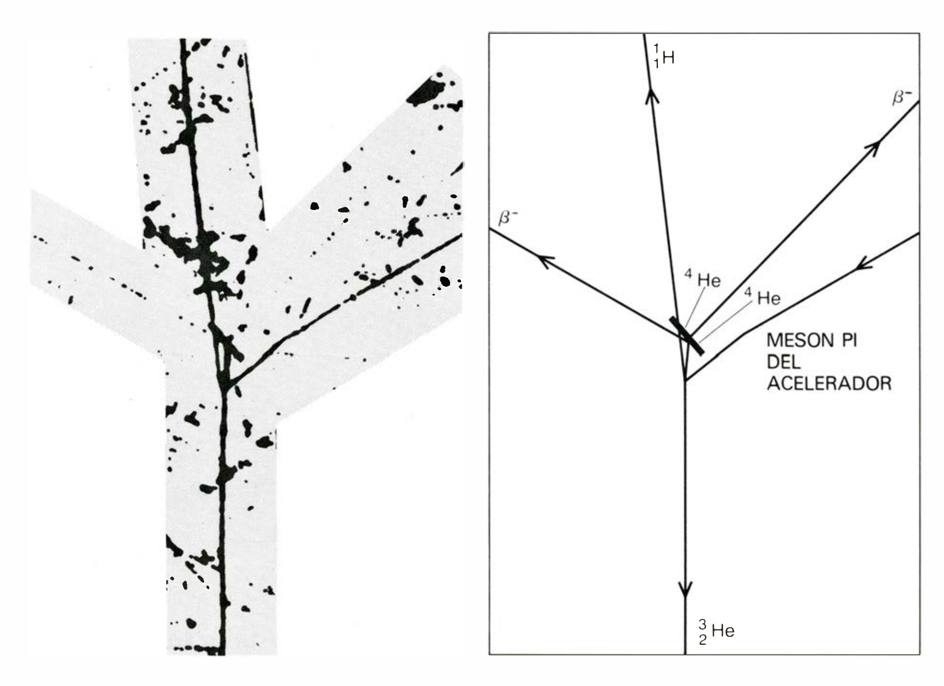
Estos experimentos establecieron la existencia del $^{21}_{12}$Mg, a la vez que su vida media y sus modos de desintegración, pero no revelaron su masa exacta. La masa se



LA LARGA VIDA MEDIA del núcleo de $^{53}_{27}$Co puede explicarse en términos de barreras que un protón debe franquear para escapar del núcleo. Hay dos barreras de éstas para el $^{53}_{27}$Co: una electrostática, generada por la repulsión eléctrica entre los protones, y otra centrífuga, que proviene del exigir que el protón emergente se lleve el gran momento angular del núcleo padre. La barrera total tiene unos 49 MeV de alto en la superficie del núcleo; como los protones emitidos tienen una energía de sólo unos 1,6 MeV, es obvio que no la pueden superar. Sin embargo, hay una pequeña probabilidad de que los protones puedan pasar a través de la barrera por el proceso mecánico-cuántico llamado efecto túnel. El protón puede contemplarse como una onda que golpea la barrera y aparece de nuevo al otro lado de ella. La onda emergente tiene la misma longitud que la onda dentro del núcleo, lo que indica que el protón posee la misma energía, pero la amplitud de la onda queda muy reducida, lo que refleja la menor probabilidad de encontrar el protón fuera del núcleo. La amplitud se rebaja en un factor de unos 10^7, que es mucho menor de lo que puede mostrarse en la ilustración. La exigua probabilidad de esta penetración, junto con un reajuste nuclear improbable que también se necesita, es lo que da cuenta de la larga vida media que se registra en dicho isótopo del cobalto. El autor de la ilustración es Gabor Kiss.



EL ISOTOPO RICO EN NEUTRONES del helio, $^8_2$He, puede desintegrarse mediante cualquiera de dos procesos no usuales. En cada caso, el suceso inicial es una emisión beta, formando el isótopo del litio $^8_3$Li. Si el $^8_3$Li se crea en un estado muy excitado, rápidamente emite un neutrón, dando lugar al producto estable $^7_3$Li. El conjunto del proceso es una emisión consecutiva de una partícula beta y de un neutrón. Si el $^8_3$Li se crea en sus estados excitados más bajos, tales estados se desintegran en el estado fundamental por radiación gamma; luego el estado fundamental se desintegra por emisión beta para dar un estado excitado inestable del $^8_4$Be. El núclido de berilio, a su vez, rápidamente emite una partícula alfa, o en otras palabras se desdobla en dos núcleos de $^4_2$He, el isótopo más común del helio. En el último camino la desintegración del istótopo del litio $^8_3$Li puede describirse bien como una emisión consecutiva de una partícula beta y de una partícula alfa.



DESINTEGRACION DE UN NUCLEO DE HELIO-8. Se registra a la izquierda en una emulsión fotográfica. Los mismos sucesos se esquematizan a la derecha. El núcleo $^8_2$He fue uno de los tres fragmentos creados cuando un núcleo de carbono de la emulsión capturó un mesón pi de baja energía. Los otros dos fragmentos, un protón ($^1_1$H) y un núcleo de helio-3 ($^3_2$He) se muestran abandonando el campo de visión. El núcleo $^8_2$He se movió sólo una corta distancia antes de pararse, y entonces sufrió dos desintegraciones beta sucesivas transformándose en $^8_4$Be, que se desdobló en dos núcleos de $^4_2$He. Las trazas de los dos núcleos de $^4_2$He van en direcciones opuestas porque el núcleo de $^8_4$Be estaba prácticamente en reposo cuando se desdobló.

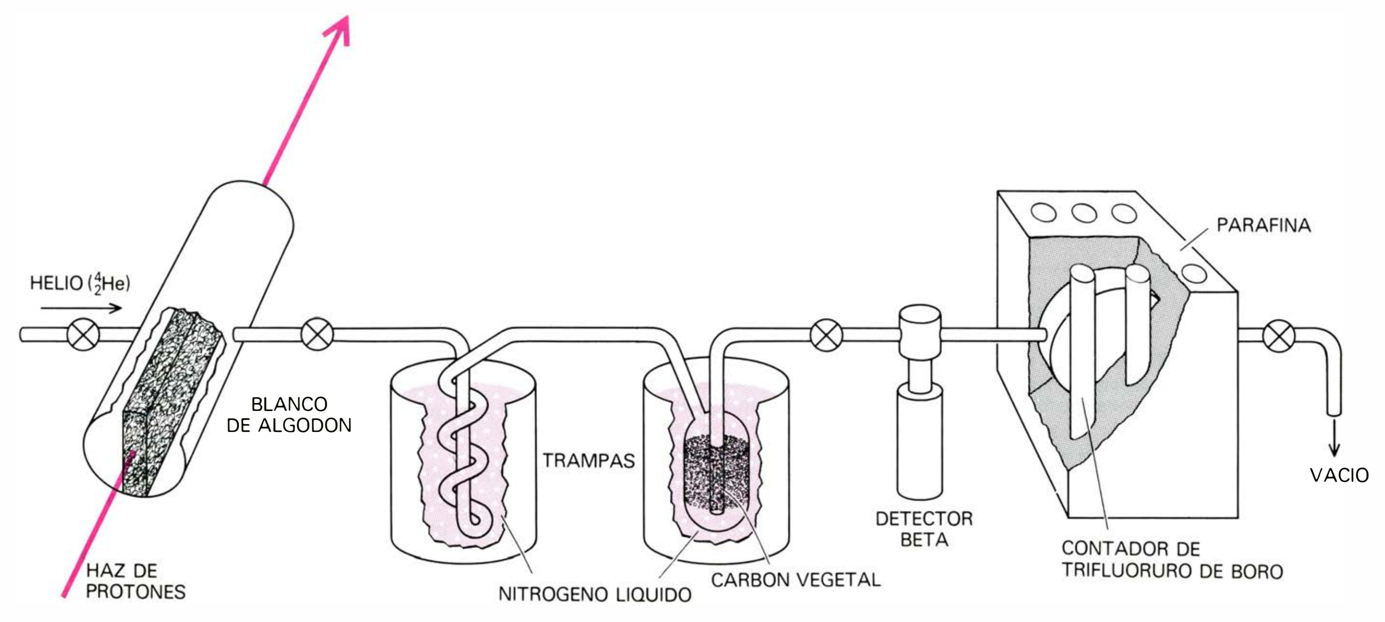
ha medido recurriendo a otra técnica por uno de nosotros (Cerny) y sus colegas, y por Walter Benenson y Edwin Kashy y sus colegas, en la Universidad estatal de Michigan. De nuevo, el proyectil acelerado fue $^3_2$He, pero se empleó como blanco el isótopo estable $^{24}_{12}$Mg. Las colisiones entre estos núcleos incluyen muy pocos sucesos en los que el núcleo de helio toma tres neutrones adicionales, creando el isótopo $^6_2$He y dejando un núcleo de $^{21}_{12}$Mg. El núcleo de $^{21}_{12}$Mg no se detecta, pero se mide la energía del núcleo de $^6_2$He. Como se conocen las energías y las masas de tres de los cuatro núcleos envueltos en la reacción, puede deducirse la masa exacta del cuarto ($^{21}_{12}$Mg) aplicando las leyes de conservación de la energía y el momento.

La emisión directa de nucleones se analizó más arriba como un modo de desintegración tan inmediato que excluye la existencia de ciertos núcleos. Sin embargo, un núclido podría desintegrarse por emisión de un protón o un neutrón con una vida media comparativamente larga, si se bloquease fuertemente la emisión por una gran barrera. En 1970 se descubrió un núclido de esta clase; se trata de un estado excitado de larga vida del isótopo del cobalto $^{53}_{27}$Co, que se desintegra por emisión directa de un protón con una vida media de 0,25 segundos. La radiactividad protónica se descubrió en el Harwell Atomic Energy Research Establishment, de Inglaterra, por un grupo de investigadores de la Universidad de Oxford; lo integraban uno de nosotros (Cerny) y K. P. Jackson, C. U. Cardinal, H. C. Evans y N. A. Jelley. El descubrimiento quedó confirmado por otros experimentos en el Lawrence Berkeley Laboratory, realizados por uno de los autores (Cerny) y J. E. Esterl, R. A. Gough y R. G. Sextro.

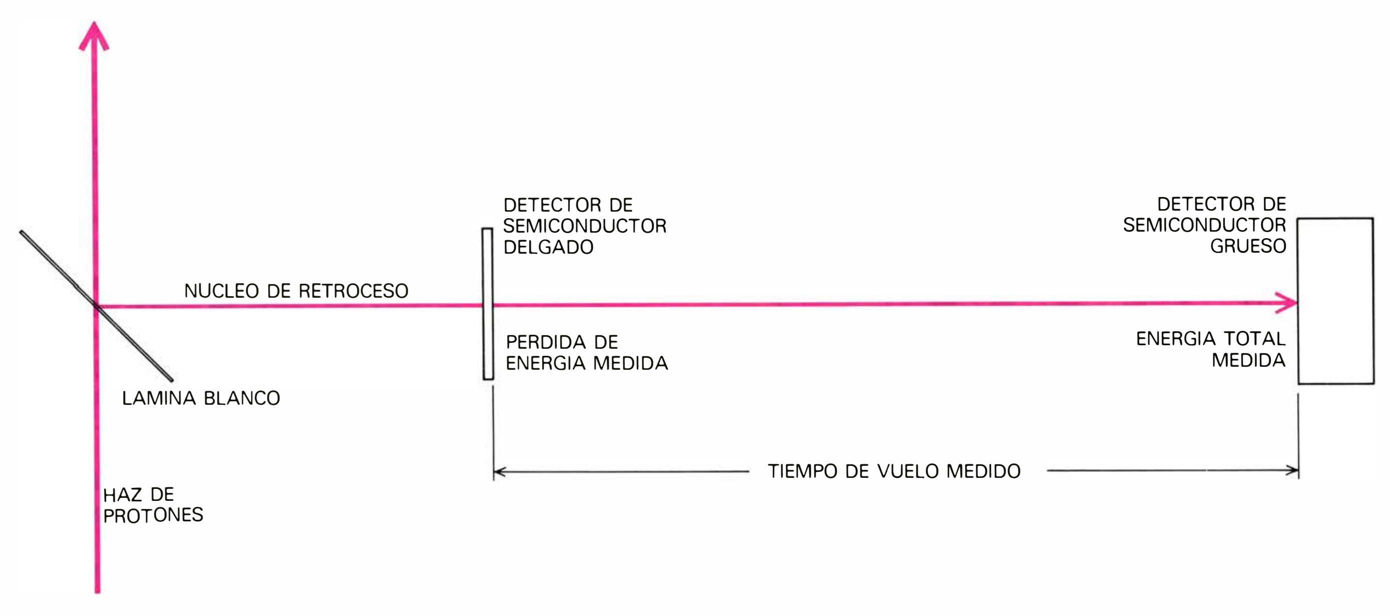
En los últimos experimentos, el núclido de cobalto se obtenía bombardeando el isótopo del hierro $^{54}_{26}$Fe con protones acelerados a una energía de 35 MeV. El producto intermedio no observado fue el isótopo de cobalto $^{55}_{27}$Co, que inmediatamente expulsa dos neutrones para dar un estado excitado del $^{53}_{27}$Co. Al contrario de la mayoría de estados excitados, éste no puede volver al estado fundamental por desintegración gamma, y por eso se le da el nombre de isómero nuclear. La mayoría de las veces se desintegra por emisión β^+, pero aproximadamente en un 1,5 por ciento de las desintegraciones se observa la emisión protónica. Al contrario de los protones liberados en las emisiones consecutivas de una partícula beta y de un protón, que provienen de varios estados excitados y, por tanto, tienen diferentes energías características, todos los protones emitidos por el $^{53}_{27}$Co están agrupados en una misma energía, 1,59 MeV.

La desintegración β^+ del $^{53}_{27}Co$ es un modo altamente favorecido porque conduce a la creación de un núcleo "espejo", que tiene la composición $^{53}_{26}Fe$ y que ocupa el mismo estado excitado que el núcleo de cobalto padre. Los núcleos espejo son un caso especial de estados análogos en núcleos; en núcleos espejo, la única diferencia entre los dos núclidos es que el número de protones y de neutrones está intercambiado. En este caso, el isótopo del cobalto padre tiene 27 protones y 26 neutrones y el isótopo del hierro hijo tiene 26 protones y 27 neutrones. Debido a que tales transiciones están altamente favorecidas, el modo de desintegración β^+ es el que influye más en la vida media del $^{53}_{27}Co$. De hecho, si la desintegración β^+ pudiera desconectarse y la emisión protónica fuera el único modo de desintegración disponible, la vida media del núclido sería de unos 17 segundos, aproximadamente 20 órdenes de magnitud mayor que la escala de tiempos usual de la emisión directa de nucleones. Es esta vida media "parcial" lo que una teoría de la lenta emisión protónica debe explicar.

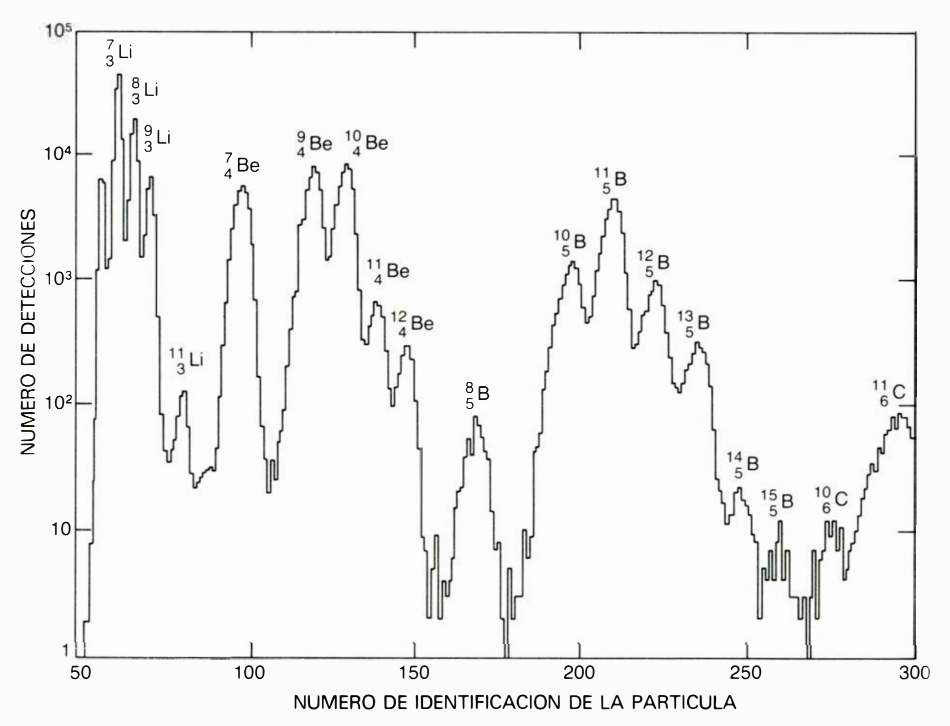
La explicación se encuentra en la barrera excepcionalmente grande que la emisión protónica debe superar. Por lo demás, la explicación se parece mucho a las interpretaciones teóricas de la emisión de partículas alfa por núcleos pesados,



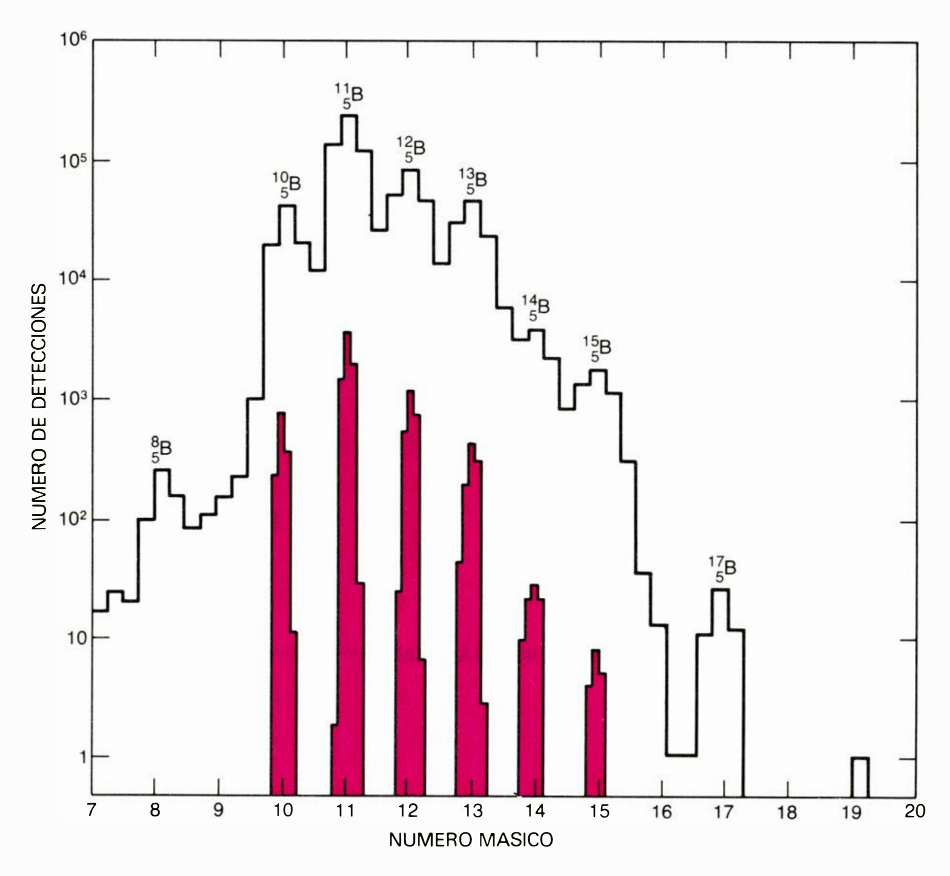
LA DETECCION DEL HELIO-8 radica en las distintas propiedades químicas y físicas del helio que permiten separar el ^8_2He de los otros muchos núclidos creados en las colisiones de partículas aceleradas con núcleos blanco. El blanco empleado es algodón que, para las reacciones nucleares que interesan aquí, puede considerarse que es carbono. Los núcleos de ^8_2He se difunden fuera de las fibras de algodón y son absorbidos por una corriente de gas helio ordinario (^4_2He). Los otros elementos se condensan fuera de la corriente en dos sifones criogénicos, capaces de ser atravesados por el helio a causa de su punto de ebullición extremadamente bajo. El gas residual fluye luego por un detector de centelleo de rayos beta hacia un tanque inmerso en un gran bloque de parafina. Los neutrones provenientes de la desintegración del ^8_2He se frenan en la parafina; pueden pues entrar en reacción con el boro de los detectores de ionización.



TELESCOPIO NUCLEAR, que identifica los núclidos que retroceden de un blanco de metal laminar colocado en el haz de un acelerador midiendo algunas de las propiedades físicas de los núclidos. El telescopio consta de dos detectores semiconductores alineados de manera que los núcleos de retroceso puedan pasar a través de los dos sucesivamente. La cantidad de energía depositada por un núcleo en cada detector puede determinarse a partir del número de iones creados. El primer detector es delgado y mide el ritmo a que el núcleo pierde energía al pasar a través de la materia; el segundo detector, que es más grueso, detiene el núcleo y mide la energía que le queda. A partir de estos datos puede determinarse una cantidad sin dimensiones llamada número de identificación de la partícula. Este es proporcional al producto del número másico y el cuadrado de la carga nuclear. En un refinamiento de la misma técnica se mide el tiempo de vuelo del núcleo entre los dos detectores. Esto determina la velocidad del núcleo que da un resultado independiente y más aproximado para su número másico.



LOS NUCLEOS DE RETROCESO de un blanco de un elemento pesado irradiado por protones de alta energía se identificaron completamente midiendo su energía cinética y su ritmo de pérdida de energía, sin calibrar su velocidad. Los picos representan la aparición de muchos isótopos producidos en esta reacción. Los núclidos ricos en neutrones $^{11}_{3}$Li, $^{14}_{5}$B y $^{15}_{5}$B se observaron por primera vez en un experimento como éste. Por otro lado, el isótopo del boro más pesado conocido, $^{17}_{5}$B, no puede observarse a causa de la interferencia con los más abundantes isótopos del carbono. La interferencia se produce porque el número de identificación de la partícula (es decir, producto del número másico y el cuadrado de la carga nuclear) resulta ser aproximadamente el mismo para determinados isótopos pesados del boro y ciertos isótopos ligeros del carbono.



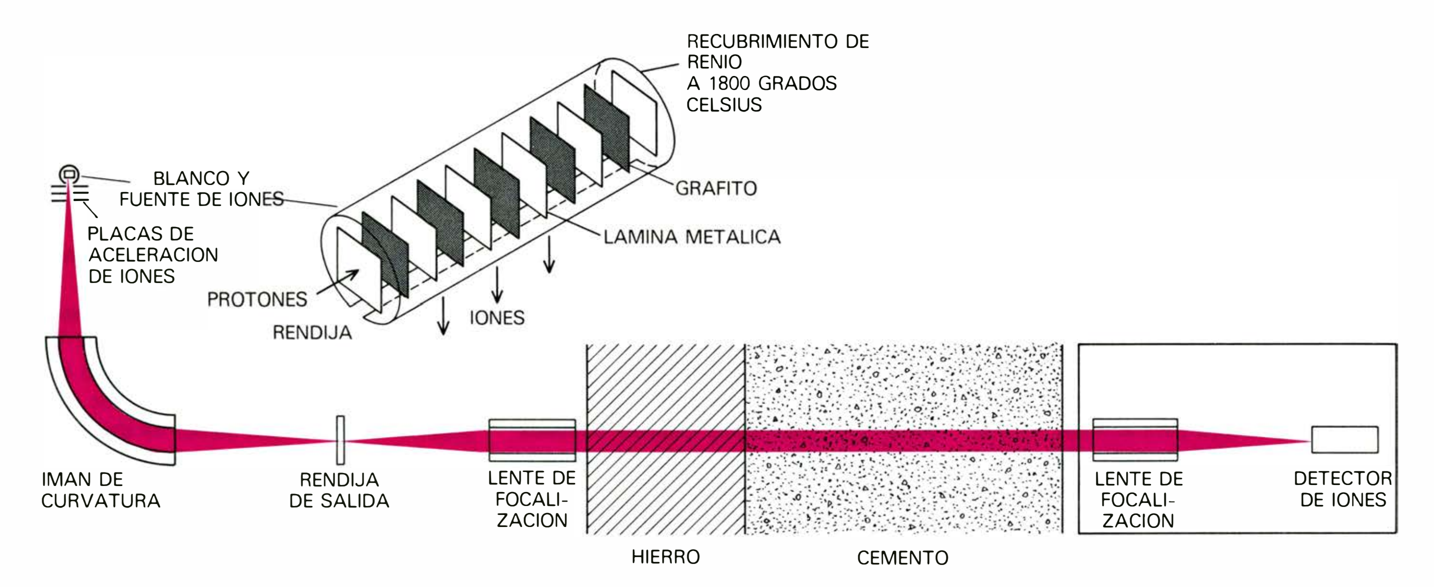
ESPECTRO DE LOS ISOTOPOS DEL BORO, que se resuelve perfectamente en experimentos en que se miden también las velocidades de los núcleos de retroceso. El boro 17 se detectó en un experimento así *(negro)*, en el cual se midió el tiempo de vuelo entre el primer y el segundo detector. Se logran resoluciones todavía mejores *(color)* midiendo el tiempo de vuelo sobre una trayectoria entre el blanco y el primer detector.

tales como el uranio 238. La principal barrera opuesta a la emisión alfa proviene de las interacciones electromagnéticas de los protones, según la ley de Coulomb de la fuerza eléctrica. Para que una partícula alfa supere la barrera de Coulomb y se escape del núcleo, precisa una energía de unos 25 MeV. Según las leyes de la física clásica sólo las partículas con esta energía u otra superior podrían escapar del núcleo; pero la realidad es que el uranio emite partículas alfa con una energía de 4,2 MeV. Estas partículas de más baja energía son capaces de salir por el proceso mecánico-cuántico denominado efecto túnel (o de transmisión) a través de la barrera de Coulomb.

En mecánica cuántica, las partículas pueden considerarse como ondas, y la onda tiene una probabilidad pequeña de penetrar una barrera. En la desintegración del núcleo de uranio, la partícula alfa tiene aproximadamente una posibilidad entre 10^{38} de escapar en un intento dado. Aunque esto es una probabilidad sumamente pequeña, la partícula alfa choca con las "paredes" del núcleo unas 10^{21} veces por segundo. Por tanto, puede esperarse que escape a los 10^{17} segundos, o tres mil millones de años. La vida media medida del uranio 238 es de 4500 millones de años.

Una barrera de Coulomb similar inhibe la emisión de protones del $^{53}_{27}$Co; ahora bien, calculando la probabilidad de que el protón atraviese la barrera, la vida media resulta ser sólo de 10^{-19} segundos, muchos órdenes de magnitud menor, todavía, que la vida media parcial observada experimentalmente. Parte de la discrepancia puede explicarse por una barrera inhibidora adicional, llamada barrera centrífuga. El núcleo $^{53}_{27}$Co tiene un momento angular excepcionalmente elevado, de 19/2 unidades, mientras que el núcleo hijo, $^{52}_{26}$Fe, se produce en su estado fundamental y tiene momento angular cero. El protón emitido debe llevarse, por tanto, las 19/2 unidades de momento angular. El espín intrínseco del protón da cuenta de media unidad; las otras 9 unidades deben aparecer como momento angular orbital del sistema formado por el núcleo hijo y el protón emitido.

La vida media esperada para que un protón penetre, a la vez, por la barrera de Coulomb y por la barrera centrífuga es de unos 6×10^{-8} segundos. El factor 3×10^{8} que falta puede explicarse por el reajuste excepcionalmente complicado e improbable de la materia nuclear que se precisa para que el estado excitado del $^{53}_{27}$Co se desintegre en el estado fundamental del $^{52}_{26}$Fe. Así se deben verificar dos sucesos independientes antes de que la desintegración pueda tener lugar: el primero,



ESPECTROMETRO DE MASAS ligado directamente a un acelerador de partículas; separa los núcleos de corta vida según su masa. El instrumento del detalle dibujado arriba es a la vez el blanco del acelerador y la fuente de iones del espectrómetro de masas. Los núcleos creados por colisiones en las láminas metálicas se paran en el grafito, donde adquieren electrones y se convierten en átomos eléctricamente neutros. Los átomos de los metales alcalinos se difunden fuera del grafito y se ionizan por contacto con el recubrimiento de renio caliente; son acelerados luego dentro del imán del espectrómetro por un potencial electrostático de 10.000 voltios. En el campo magnético los iones se desvían según varios ángulos de acuerdo con la masa. Se selecciona cierta masa para su estudio mediante una rendija de salida; los iones pasan luego al detector. El espectrómetro de masas denominado "on line" se desarrolló en el Laboratorio Orsay.

que el protón saliente atraviese ambas barreras y el segundo, que el núcleo residual tenga una estructura que se parezca al ${}^{52}_{26}Fe$.

Puede presentarse otro modo de desintegración en algunos núcleos que son extremadamente deficitarios en neutrones. Este modo, sugerido primeramente por V. I. Goldanskii, del Instituto de Química Física de Moscú, es la emisión simultánea de dos protones. Esto puede suceder en un núcleo par-par en que la desintegración al núcleo siguiente más ligero (y por tanto impar-par) sea energéticamente imposible; en un tal núcleo la favorecida estabilidad de los núcleos par-par puede favorecer la emisión protónica doble.

En el lado del valle de estabilidad rico en neutrones el fenómeno característico de la emisión protónica no es posible. Tiene lugar la emisión consecutiva de una partícula beta y de un neutrón, y de hecho se conoce desde mucho antes, desde 1939. El primer elemento ligero capaz de desintegrarse por emisión retardada de un neutrón se descubrió en 1948 por Ernest O. Lawrence y fue identificado como ${}^{17}_{7}N$ por Luis W. Alvarez. Porque los neutrones son eléctricamente neutros no se detectan tan fácilmente como los protones, y se requieren técnicas experimentales distintas.

Cuando el núclido de interés es un isótopo de un elemento gaseoso es aún posible transportarlo del blanco del acelerador al detector. Tal técnica fue empleada por Alvarez para el ${}^{17}_{7}N$ y más tarde por uno de nosotros (Poskanzer) en el estudio del helio 8, el isótopo más pesado del helio y el único núclido que tiene tres veces más neutrones que protones. Los núcleos de ${}^{8}_{2}He$ se crearon irradiando los núcleos de carbono del algodón con protones de alta energía, que ocasionalmente rompían los núcleos de carbono. Los átomos de helio se difundían fuera de las delgadas fibras de algodón y entonces eran arrastrados por una corriente de helio ordinario a través de una serie de sifones criogénicos, que condensaban todos los elementos que no fuesen helio, para llegar luego al equipo de detección. Allí se controlaban las emisiones beta y gamma con detectores de centelleo; se frenaban los neutrones mediante parafina y se contaban con un detector de trifluoruro de boro. Este último se funda en el hecho de que un núcleo de ${}^{10}_{5}B$, después de absorber un neutrón lento, se desintegra algunas veces por emisión alfa; la ionización causada por las partículas alfa puede detectarse. Sin embargo, el detector sólo cuenta los neutrones; no puede medir su energía.

Estos estudios revelaron una desintegración secuencial poco común para el ${}^{8}_{2}He$. Aproximadamente un 12 por ciento de las veces, el núcleo se desintegra por emisión β^- en un estado altamente excitado del isótopo del litio ${}^{8}_{3}Li$; luego, dicho estado se desintegra rápidamente por emisión de un neutrón en ${}^{7}_{3}Li$. En otras palabras, esta desintegración es un ejemplo de emisión de neutrón beta retardada (o emisión consecutiva de una partícula beta y de un neutrón). En el resto de las desintegraciones, la emisión β^- inicial conduce a un estado excitado del ${}^{8}_{3}Li$ más bajo, que, a pesar de ser incapaz de emitir un neutrón, se desintegra en el estado fundamental por radiación gamma. Sin embargo, el estado fundamental del ${}^{8}_{3}Li$ tampoco es estable, sino que produce una desintegración β^- dando ${}^{8}_{4}Be$, que se rompe rápidamente en dos núcleos de ${}^{4}_{2}He$. (La última desintegración puede considerarse como un ejemplo de emisión alfa-beta retardada, o emisión consecutiva de una partícula beta y de una partícula alfa). El conjunto de la reacción puede describirse, por tanto, como un átomo de helio (${}^{8}_{2}He$) rompiéndose en dos átomos de helio (${}^{4}_{2}He$) más dos electrones y dos antineutrinos.

Un método eficaz de crear muchas especies ricas en neutrones es bombardear un elemento pesado, tal como el uranio, con protones de alta energía, capaces de arrancar pequeños fragmentos del núcleo. En el núcleo de uranio, la razón de 1,6 neutrones por cada protón proporciona una estabilidad óptima; pero cuando esa misma razón se traspasa a un fragmento ligero, representa un exceso muy notable. Tal procedimiento tiene en desventaja que una enorme variedad de núclidos se crean a la vez, y de alguna manera deben distinguirse unos de otros. A pesar de esta dificultad, la mayoría de núclidos de extraordinaria riqueza en neutrones se han descubierto por alguna variante de este método.

Para identificar los distintos núclidos creados, puede recurrirse a la energía cinética con que se expulsan del blanco. La identificación puede lograrse por un simple "telescopio" formado por dos detectores de ionización que el núcleo de retroceso encuentra sucesivamente. El primer detector es delgado, y el núcleo pasa a través de él, depositando sólo una parte de su energía; el segundo detector es lo suficientemente grueso como para detener los núcleos y medir la energía total remanente. Se sabe que el producto de estas energías es proporcional al producto del número má-

sico y el cuadrado de la carga nuclear del fragmento. Aunque hay unos pocos núcleos que no pueden distinguirse entre sí de esta manera, la mayoría se identifican unívocamente.

Por este método el núclido $^{11}_{3}$Li, extremadamente rico en neutrones, fue descubierto por nosotros y Earl K. Hyde y S. W. Cosper en el Lawrence Berkeley Laboratory. El núclido aparece como un pequeño pico en una curva que registra la producción de muchos núcleos más corrientes. El pico sólo revelaba que el núcleo vivía lo bastante para alcanzar los dos detectores, unos 10^{-8} segundos. Esto constituyó en sí mismo una sorpresa, porque los cálculos teóricos habían indicado que el $^{11}_{3}$Li debía ser un emisor rápido de neutrones. Otros emisores rápidos de neutrones no aparecían como picos en la curva.

En un refinamiento de esta técnica desarrollado por Gilbert W. Butler, James D. Bowman y uno de nosotros (Poskanzer), el diferencial de energía perdido en el detector delgado se emplea únicamente para determinar la carga nuclear. El número másico se da por la energía cinética total y la velocidad de la partícula, determinándose la velocidad por la medida del tiempo de vuelo entre los dos detectores. Debido a que las velocidades son del orden del 5 por ciento de la velocidad de la luz y que la trayectoria sobre la que se mide es sólo de unos 25 centímetros, la medida del tiempo debe tener una precisión de unos 10^{-10} segundos. A cambio de hacer esta precisa medida, los núclidos se identifican sin ambigüedad tanto por el número de protones como por el número másico. Por este método se descubrió un nuevo isótopo del boro, $^{17}_{5}$B. Este había quedado enmascarado por varios isótopos del carbono en un experimento anterior.

Se obtuvo un nuevo refinamiento de la técnica en un experimento realizado en Los Alamos Meson Physics Facility por Butler, Dennis G. Perry, Louis P. Remsberg, Joseph B. Natowitz, Franz Plasil y uno de nosotros (Poskanzer). El haz de protones de alta intensidad producido allí se divide en pulsos de sólo unos 10^{9} segundos de largo. Midiendo el tiempo de vuelo de un fragmento entre los dos detectores, ambos situados lejos del blanco, se puede determinar qué pulso del haz produjo el fragmento. Conocido esto, puede medirse entonces el tiempo de vuelo sobre la trayectoria de unos cinco metros que hay del blanco al primer detector. La resolución en masas conseguida de esta manera, mucho mayor, ha llevado a la identificación de cinco nuevos núclidos ricos en neutrones en la zona del neón al fósforo.

Muchos núclidos ricos en neutrones han sido también identificados por V.V. Volkov y sus colegas del Instituto de Investigación Nuclear de Dubna. Ellos empleaban también como blanco un elemento pesado, que era bombardeado por ciertos haces de partículas; verbigracia, con núcleos de helio. Los núcleos de retroceso se identificaban midiendo su energía cinética con un detector de ionización y su momento con un campo magnético. A pesar del éxito de estas técnicas queda por detectar gran número de núcleos ricos en neutrones.

A lo sumo, las técnicas experimentales indicadas más arriba pueden revelar solamente la existencia de un núclido; para determinar su masa, vida media o modos de desintegración se precisan métodos más elaborados. D. R. Goosman y David E. Alburger, del Brookhaven National Laboratory, han estudiado muchos núcleos exóticos produciéndolos en forma selectiva mediante el empleo de haces desacostumbrados y blancos isotópicamente puros. Cuando es necesario irradiar blancos de elementos pesados, sin embargo, hay una tal variedad de productos que el núclido de interés debe separarse físicamente del blanco y de los otros núcleos producidos.

Un potente método de lograr la separación con la velocidad requerida ha sido desarrollado por R. Klapisch y C. Thibault, de los laboratorios de Orsay en Francia. En su método, los núcleos producidos se recobran del blanco en la forma de átomos ionizados y se inyectan directamente en un espectrómetro de masas. En el espectrómetro se aceleran los iones hasta una velocidad fija, para pasar luego a través de un campo magnético. La medida en que se curvan por acción del campo sus trayectorias está determinada por su momento, y, en consecuencia, por su masa. Una rendija de salida permite que sólo los núclidos dotados de una masa particular seleccionada alcancen un detector de iones. Se emplea un aparato similar en otra máquina, llamada ISOLDE, en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN), cerca de Ginebra. Este aparato ha detectado recientemente el isótopo del argón con mayor déficit de neutrones que está predicho que exista, $^{32}_{18}$Ar.

El dispositivo construido en Orsay es particularmente adecuado para el estudio de los metales alcalinos; merced, en gran

LAS MASAS DE LOS ISOTOPOS DEL SODIO se determinaron hasta la región de gran exceso de neutrones con el espectrómetro de masas "on line" en los experimentos realizados en el Centro Europeo para la Investigacion Nuclear (CERN). La gráfica es un corte transversal del valle de estabilidad en el lugar donde el número de protones es 11. De nuevo, la cantidad representada es el exceso de masa. Las masas de los isótopos en que el número de neutrones es impar *(color)* se representan separadamente de aquellos en que es par *(negro)*; los dos grupos forman series separadas porque los núcleos en que las partículas forman pares tienen mayor estabilidad. Las masas de otros dos isótopos, del sodio (a saber, números másicos 33, 34) están siendo determinadas por los experimentadores; se ha podido observar el isótopo con número másico 35.

parte, al trabajo con esta máquina se conocen más isótopos ricos en neutrones del sodio y del potasio que de cualquier otro elemento ligero. Todavía más, se han determinado las masas, vidas medias y modos de desintegración de la mayoría de estos isótopos.

El grupo de Orsay pudo medir la vida media del $^{11}_{3}$Li controlando el ritmo a que la actividad disminuía después de que cada pulso de partículas irradiaba el blanco. Encontraron que tiene una vida media de 8,5 milisegundos. A fin de medir otras propiedades de los núclidos, el detector de iones en la rendija de salida se sustituye por una lámina metálica sobre la que se depositan los iones. Las emisiones beta, gamma y de neutrones pueden controlarse luego con detectores convencionales, sin la complicación de sucesos de fondo de otros núclidos. De esta manera se encontró que el $^{11}_{3}$Li y todos los isótopos del sodio entre el $^{29}_{11}$Na y el $^{32}_{11}$Na eran emisores de neutrones beta retardados (emitían consecutivamente una partícula beta y un neutrón).

Finalmente, la masa del $^{11}_{3}$Li fue medida por la colaboración de Orsay y uno de nosotros (Poskanzer). El espectrómetro de masas tiene una resolución intrínseca aproximada de una parte en 500, que es suficiente para discriminar entre isótopos, pero es inadecuada para una medida precisa de la masa. A fin de determinar la energía de enlace del núclido, la masa debe conocerse con una precisión de 0,1 MeV; puesto que la masa total del $^{11}_{3}$Li ronda los 11.000 MeV, ello requiere una resolución de una parte en 100.000, aproximadamente. La precisión necesaria se obtuvo midiendo la masa de decenas de miles de núcleos de $^{11}_{3}$Li y promediando luego los resultados. Se encontró que el litio 11 está ligado frente a la emisión rápida de un neutrón por sólo 0,17 MeV (± 0,08 MeV). Se han medido las masas de los isótopos del sodio hasta el $^{34}_{11}$Na.

El estudio de los núcleos exóticos continúa generando resultados inesperados. Aunque en el lado de deficiencia de neutrones del valle de estabilidad se conocen todos los núcleos hasta el $^{20}_{12}$Mg cuya existencia se ha predicho, sólo para el hidrógeno, helio, litio y berilio las fronteras han sido empujadas hasta el límite de existencia en ambos lados de la estabilidad. Queda mucho por aprender por lo que respecta a los otros elementos ligeros. Se necesitarán nuevos métodos de producción y métodos ingeniosos de detección. Interesa explorar los núcleos en todas sus formas exóticas y no confinarse simplemente a la región próxima al estrecho fondo del valle de estabilidad. Quizá se descubrirán otros modos de desintegración radiactiva. Y habrán de surgir ciertamente nuevos conocimientos de la estructura de los núcleos.

El estancamiento de las aguas del mar Mediterráneo

Los sedimentos del Mediterráneo han registrado una evolución cíclica de las condiciones oceanográficas, resultado de los cambios climáticos del Cuaternario. El fenómeno más aparente ha sido el depósito de sapropeles, considerados una de las mayores fuentes de hidrocarburos

Andrés Maldonado

Los sedimentos profundos del Mediterráneo revelan numerosos detalles sobre climas pasados, circulación oceánica y distribución de tierras y mares. Dichos fenómenos se encuentran registrados en la capa más superficial de sedimentos blandos. La serie sedimentaria muestreada representa desde unas pocas decenas de miles hasta varios centenares de miles de años, o lo que es lo mismo, todo el Holoceno y parte del Pleistoceno del período Cuaternario.

Desde la primera campaña oceanográfica de la "Expedición Sueca a Aguas Profundas" (Swedish Deep-Sea Expedition), en 1947-48, al Mediterráneo oriental, se puso en evidencia la existencia en estas cuencas profundas de capas aisladas, relativamente delgadas, de sedimentos negros ricos en materia orgánica. Tales sedimentos recibieron el nombre de sapropeles. El alto contenido orgánico llevó a sugerir su depósito durante períodos de estancamiento de las aguas profundas, con eliminación del oxígeno del fondo. A partir de entonces, numerosos investigadores han profundizado en el análisis de estos sedimentos. El creciente interés nace de dos hechos fundamentales: de una parte se piensa que gran parte de los hidrocarburos explotados en series antiguas han sido generados a partir de depósitos similares; de otra, el establecimiento de las causas que dan lugar a la formación de sapropeles puede ser la clave para la interpretación de los climas del Cuaternario, así como de antiguos regímenes de circulación en el Mediterráneo. Gracias al empleo de técnicas altamente especializadas (datación radiométrica absoluta, análisis isotópicos, estudios bioestadísticos detallados y correlaciones estratigráficas a escala regional) se ha podido llegar en la presente década a la formulación de hipótesis más fundamentadas.

Cualquier modelo que se diseñe debe estar basado en la correcta interpretación de las siguientes cuestiones: (1) origen de la materia orgánica; (2) edad absoluta de los diferentes niveles y establecimiento de su estratigrafía; (3) relación entre períodos de formación de sapropeles y cambios climático-eustáticos del Cuaternario, o lo que es lo mismo, establecimiento de la variación paleoclimática; (4) correlación entre las diferentes cuencas mediterráneas, y (5) causas de la alternancia de niveles de sapropeles y lodos calcáreos. Aunque han sido propuestas diversas hipótesis que permiten resolver algunas de estas cuestiones, el consenso general está lejos de haberse alcanzado.

Nuestro propio modelo, aunque no totalmente original, presenta la novedad de responder satisfactoriamente a las numerosas observaciones realizadas por diversos grupos de investigadores. Este modelo es también una base importante para el conocimiento de las causas que han podido originar el desarrollo de períodos anóxicos en los océanos mundiales.

El Mediterráneo es un mar alargado, que constituye una cuenca interna rodeada por continentes; realiza su conexión con el océano Atlántico a través del umbral constituido por el estrecho de Gibraltar, y está, asimismo, formado por una serie de cuencas individualizadas por umbrales internos. Ocupa una superficie de unos 2.500.000 kilómetros cuadrados, extendiéndose por más de 3500 kilómetros entre el estrecho de Gibraltar y las estribaciones montañosas del Líbano, mientras que la anchura máxima no sobrepasa los 650 kilómetros. La batimetría es muy variada, encontrándose fosas profundas con más de 5000 metros, mientras que su profundidad media es de 1500 metros; más del 90 por ciento de su superficie se encuentra a profundidades superiores a los 200 metros. Ocupa en la actualidad un cinturón climático caracterizado por un exceso de evaporación con respecto a pluviometría y descarga fluvial. El fuerte aislamiento del resto de los océanos lo sitúan en una posición particularmente favorable para el estudio de la influencia de las condiciones locales sobre la sedimentación.

Pero si el estudio geológico de las complejas cadenas alpinas que lo rodean se viene realizando desde hace más de 100 años, no es sino a partir de la campaña oceanográfica del *Albatros*, en 1947-1948, cuando sus sedimentos profundos empiezan a ser conocidos. Desde estas fechas la investigación del mar Mediterráneo ha llamado la atención de numerosos grupos de investigadores que realizan una activa labor geofísica, referente a la constitución profunda y sedimentológica de los niveles superficiales. El descubrimiento de petróleo en sus costas, la explotación pesquera intensiva, los problemas relacionados con la estabilidad costera y contaminación de sus aguas han condicionado un creciente interés durante las últimas décadas. Recientemente, las dos campañas del buque oceanográfico de sondeos profundos *Glomar Chellenger*, durante 1970 y 1975, han aportado nueva luz. Gracias a estos estudios, muchas de las interpretaciones previas, basadas en el conocimiento de las tierras emergidas, han sido totalmente replanteadas.

El Mediterráneo ocupa la zona denominada mediterráneo-alpina, que forma la charnela entre los bloques continentales africano-árabe y euro-asiático. Desde el punto de vista geológico se distinguen varias cuencas, las cuales están íntimamente asociadas a las cadenas alpinas. Estas cadenas se continúan en mar (Baleares, Sicilia, Creta, Chipre), donde tienen su expresión como dorsales submarinas o arcos de islas. Algunas de las cuencas profundas se prolongan asimismo hacia

tierra, constituyendo cuencas sedimentarias, mientras que otras están totalmente individualizadas.

Geográficamente se distinguen tres provincias principales: oeste, central y este, cada una de las cuales está constituida por varias cuencas, individualizadas por dorsales submarinas, bloques tectónicos, umbrales, estrechos y las principales penínsulas (ibérica, Apeninos, y helénica). La provincia occidental contiene el mar de Alborán y la cuenca algero-balear. El bloque de Córcega-Cerdeña separa la provincia central, que contiene las profundas cuencas tirrena y jónica y el poco profundo mar Adriático. La provincia oriental está fundamentalmente formada por el mar de Levante, con sus cuencas profundas, la dorsal mediterránea y las fosas del arco helénico, y el complejo mar Egeo, con su configuración en arco de islas en la parte meridional.

El régimen de circulación en el Mediterráneo se ha descrito como un "motor térmico", movido por la evaporación, con su regulador en Gibraltar. En su conjunto, puede considerarse como un ejemplo de mar adyacente desarrollado bajo clima árido, que está caracterizado por un exceso de evaporación. No obstante, a la escala humana el balance hídrico y el contenido en sales se mantiene constante. Puesto que el aporte de sales por los ríos desempeña un papel muy reducido, el balance en sal debe conservarse a través del intercambio de aguas de procedencia atlántica y mediterránea en el estrecho de Gibraltar. La evaporación anual promedio del Mediterráneo es de 1,31 metros, la cual es compensada por 0,08 m de influjo del mar Negro a través del estrecho de Bósforo, 0,20 m de ríos, 0,35 m de precipitación y 0,68 m (o 1740 km^3 por año) de influjo neto a través del estrecho de Gibraltar. El aporte de agua del Atlántico, con salinidad del 36,15 por mil, en superficie en Gibraltar es de 38.000 km^3/año, la cual es compensada por una corriente profunda de salida de agua mediterránea de (38.000 - 1740) km^3/año, con una salinidad de 37,90 por mil.

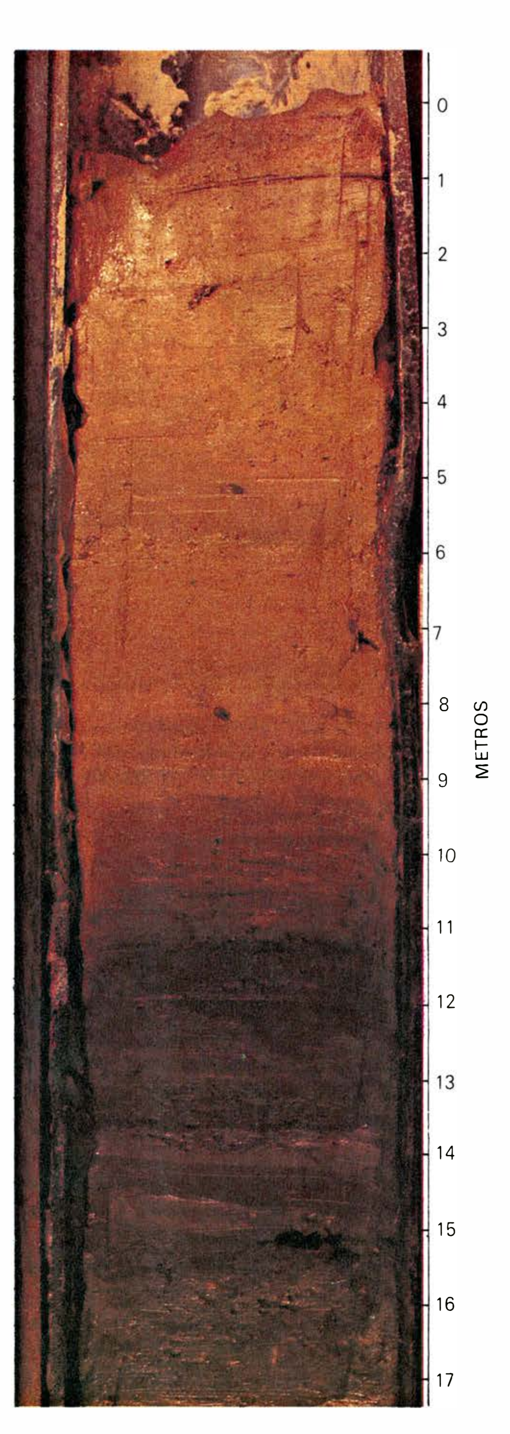
Para superar los gradientes de salinidad la superficie del mar desciende 10-15 centímetros hacia el Mediterráneo en Gibraltar, y otros 30 centímetros o más de gradiente hidráulico son requeridos entre Gibraltar y la parte más oriental.

La transformación del agua atlántica menos salina en agua mediterránea más salina ocurre durante su movimiento en superficie hacia el este, especialmente durante el invierno y primavera, cuando la evaporación es más intensa debido a los fuertes vientos. Durante el verano se forma una termoclina a unos 20-40 metros de profundidad, por calentamiento de la capa superficial, que impide el intercambio entre las diferentes masas de agua. En el otoño e invierno se rompe esta estabilidad, y el agua cargada en sales del Mediterráneo oriental se hunde y fluye en profundidad, como una capa de agua intermedia, hacia el Atlántico a través de los estrechos de Sicilia y Gibraltar. El agua profunda del Mediterráneo oriental está caracterizada por temperatura de 13,2 grados C y salinidad de 38,65 por mil. El agua intermedia tiene una temperatura de 15 grados C y salinidad de 39,1 por mil.

El resultado final de este mecanismo es facilitar la oxigenación y renovación de las aguas del Mediterráneo. El período de tiempo necesario para esta renovación puede estimarse en unos pocos centenares de años, considerando un influjo de 15 m por año en Gibraltar y una profundidad media del Mediterráneo de 1500 metros.

La oxigenación de las distintas masas de agua, excepto en áreas de estancamiento local o afloramiento de aguas profundas (upwelling), es una característica común a todos los océanos actuales. Esta situación se origina por la formación de agua superficial fría en los polos, la cual se hunde y avanza hacia las llanuras abisales; tal formación se encuentra íntimamente ligada al clima actual. En función de éste, se forman además termoclinas y haloclinas, las cuales pueden impedir la mezcla entre las masas de agua estratificada, pero que sólo son temporalmente estables. Estos factores y otros adicionales mezclan completamente las aguas oceánicas en un período de unos pocos centenares o miles de años. En consecuencia, el oxígeno molecular es suministrado a las aguas profundas a un ritmo superior al que es consumido por la oxidación de la materia orgánica y los seres vivientes.

Pero en condiciones especiales, creadas por climas pasados más cálidos o en mares adyacentes desarrollados bajo climas húmedos, las termoclinas y haloclinas pueden llegar a ser relativamente estables. En estas circunstancias, el límite de densidad entre las diferentes masas de agua sólo queda afectado por fluctuaciones verticales, como respuesta a cambios estacionales, actividad tectónica o alguna otra perturbación importante del medio ambiente, pero no suele romperse totalmente la estratificación. En tales condiciones el oxígeno molecular se mantiene relativamente abundante en la zona eufótica, pero gradualmente baja a cero por debajo de la superficie de estratificación. Este fenómeno lleva al desarrollo de condiciones anóxicas (no oxigenadas) en las aguas profundas, en las cuales se eliminan las formas de vida elevada y se sustituye el oxígeno molecular por anhídrido sulfhídrico.



SECCION de un testigo del Mediterráneo oriental. Los sedimentos superficiales, fuertemente oxidados, corresponden a los lodos calcáreos que soportan una importante actividad biológica. Los lodos negros de sapropel, con un elevado contenido en materia orgánica, no presentan señales de vida bentónica.

Ejemplos actuales de cuencas anóxicas se encuentran tanto en depresiones aisladas por barreras topográficas dentro de mares abiertos (fosa de Cariaco), como en mares adyacentes con un balance positivo en el influjo de agua dulce (mar Negro). El fondo de estas cuencas está formado por lodos negros reducidos y con elevado



EL MEDITERRANEO se caracteriza batimétricamente por diversas cuencas profundas (*azul obscuro*), individualizadas por umbrales y una topografía submarina muy diversa, mientras que las plataformas continentales (*gris*) ocupan una extensión reducida. La conexión con el océano Atlántico se mantiene a través del estrecho de Gibraltar; a su vez, las provincias orientales y occidentales están conectadas por los umbrales someros del Estrecho de Sicilia.

contenido en materia orgánica. La inexistencia de vida bentónica permite una perfecta conservación de las estructuras sedimentarias, estando los depósitos generalmente formados por una alternancia de finas láminas, a manera de varvas, formadas bajo diferentes condiciones estacionales. Las capas de sapropel, encontradas a varios niveles en los testigos continuos del Mediterráneo oriental, son análogas a estos depósitos.

Finalmente hay otra situación bajo la cual se pueden desarrollar depósitos similares al sapropel. Esta se presenta localmente donde la capa de "oxígeno mínimo" de los océanos está muy desarrollada, tal como en la parte occidental de la India, Perú y el golfo de California. En la zona tropical del océano Pacífico oriental, por ejemplo, la capa de oxígeno mínimo se extiende normalmente desde los 100 a los 1500 metros, y el oxígeno desciende a niveles por debajo de 0,1 mililitros por litro. Estos valores están en el límite de supervivencia de los organismos, y donde tales aguas interceptan al margen continental se acumulan depósitos ricos en materia orgánica, que pueden estar varvados. Tal fenómeno se advierte especialmente favorecido en zonas de afloramiento, donde se promueve una fertilidad alta de las aguas superficiales, siendo las aguas profundas relativamente viejas, y, en consecuencia, deficientes en oxígeno.

A partir del breve bosquejo oceanográfico se pueden deducir varias consecuencias importantes. Entre ellas, que el régimen de circulación, en gran medida controlado por el clima, condiciona los tipos de depósito y que la morfología de la cuenca determina, en última instancia, su propio régimen circulatorio.

¿Qué tipo de registro sedimentológico se ha efectuado en estos depósitos y cómo nos pueden ayudar a comprender la evolución más reciente del Mediterráneo? La información disponible de aguas profundas se puede clasificar en tres grupos netamente diferentes. Los registros sísmicos continuos de gran resolución suministran una información primordial acerca de la distribucion, tipos y espesores de diferentes unidades, pero por sí solos presentan una validez limitada para el conocimiento litológico de los depósitos. La situación opuesta está representada por los testigos continuos de pistón, que suministran muestras de sedimentos poco deformadas, pero que generalmente sólo alcanzan a penetrar menos de 10 metros y requieren una interpretación delicada para el establecimiento de la relación entre distintas unidades. Los sondeos profundos realizados en la campañas del *Glomar Challenger* dan una información esencial que complementa las técnicas anteriores, si bien sólo se ha perforado en 22 localidades y el registro es bastante incompleto (del orden del 20 por ciento de la columna sedimentaria atravesada).

Los testigos continuos de pistón reúnen dos claras ventajas: hay un gran número de ellos, varios centenares procedentes de diversas campañas, y suministran un registro continuo de sedimentos inalterados. La limitación más importante de esta técnica se centra en el reducido espesor de la serie estratigráfica que puede ser muestreada, lo que implica la necesidad de realizar extrapolaciones en el tiempo.

Del análisis rápido de estos testigos, la conclusión inmediata es que en su mayoría están constituidos por lodos, los cuales en muchos casos llegan a integrar casi el 100 por ciento de la sección muestreada. En áreas de aguas afuera de deltas se encuentran asimismo importantes capas de arenas, pero incluso en estos casos las arenas suelen estar muy localizadas.

Esta uniformidad es sólo aparente y el estudio sedimentológico detallado revela una notable variedad de tipos, que pueden agruparse en dos categorías principales: depósitos gravitativos, originados en su mayoría a partir de corrientes de turbidez, y depósitos hemipelágicos, formados por la sedimentación de partículas en suspensión a través de la columna de agua. Pero si esta distinción requiere un análisis minucioso de laboratorio, hay un hecho que llama inmediatamente la atención. Los testigos del Mediterráneo oriental están formados por una alternancia irregular de capas grises, negras, pardas e incluso blancas que se repiten a varios niveles. Por el contrario, en el Mediterráneo occidental los sedimentos son bastante uniformes y sólo se observan cambios sutiles en textura o color.

¿Cuáles son las condiciones diferenciales de estas dos cuencas que han dado lugar a depósitos tan distintos? ¿Cómo han evolucionado estas condiciones en el

tiempo para dar lugar a la sedimentación alternante? ¿Qué factores de ámbito local o regional han influido en este cambio? La respuesta correcta a estas preguntas exige el conocimiento del tipo de ambiente requerido para la formación de los diferentes lodos, realizar una estratigrafía detallada y el establecimiento de la distribución de los tipos de depósitos en el ámbito del Mediterráneo.

Nuestros estudios en el Mediterráneo oriental han demostrado la naturaleza cíclica de la sedimentación y que cada ciclo está formado por tres divisiones. La división basal está constituida predominantemente por lodos grises y a ella se encuentran frecuentemente asociados depósitos gravitativos. La división media es de color gris obscuro a negro, y contiene un nivel de sapropel rico en materia orgánica. Finalmente, la división superior es de colores *beige* claros y, al contrario de las divisiones basales, es muy rica en carbonatos. Entre estas dos últimas divisiones frecuentemente aparece una delgada capa de sedimentos de anaranjados a rojos, que marcan el límite de una muy manera definida.

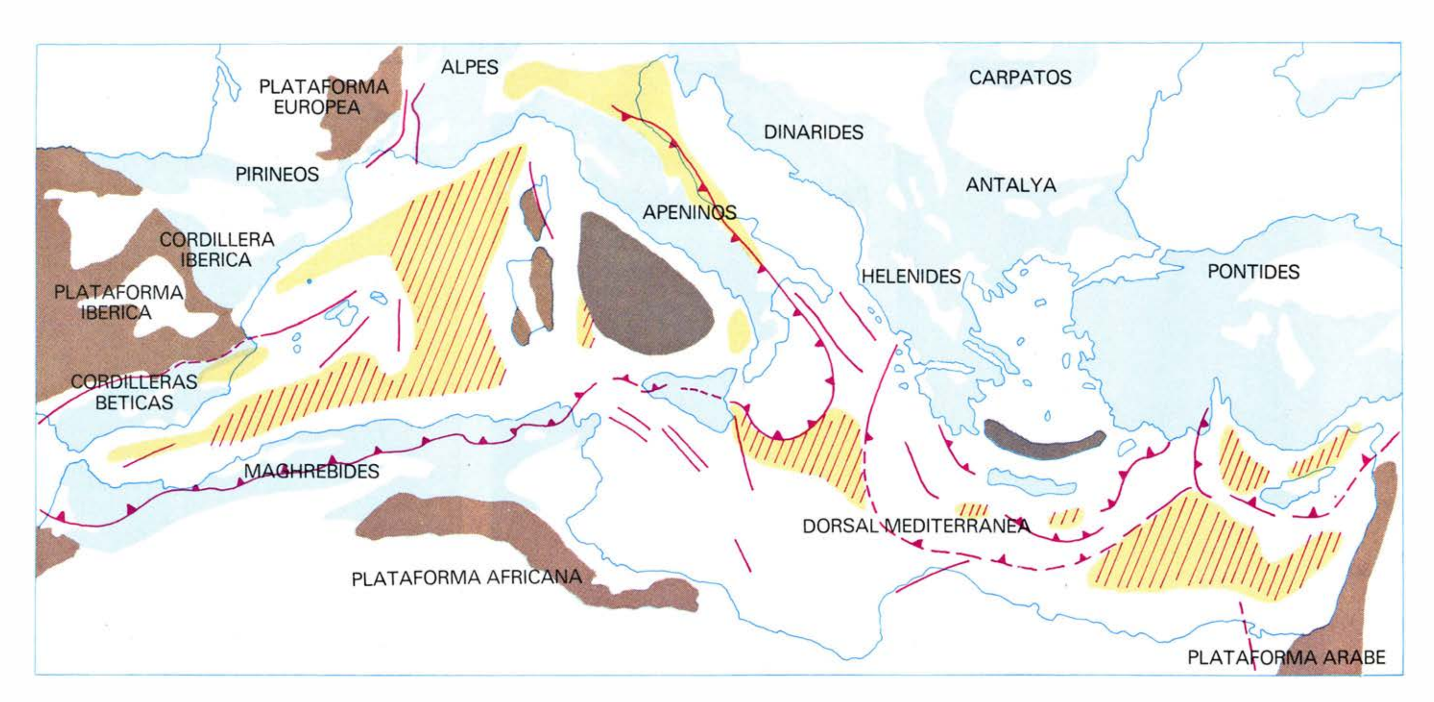
A excepción del nivel de sapropel, las diferentes divisiones ponen de manifiesto la existencia de actividad biológica sobre el fondo. Esta se manifiesta por diferentes tipos de bioturbación, que alteran y mezclan vertical u horizontalmente los depósitos, destruyendo parcialmente las estructuras sedimentarias primarias. El sapropel, por el contrario, presenta una fina laminación horizontal y no contiene ninguna prueba de vida organizada sobre el fondo. La vida bentónica es eliminada durante el depósito del nivel de lodos orgánicos existente por debajo del sapropel, los cuales contienen abundantes tubos orgánicos (burrows) rellenos de pirita. Estas observaciones demuestran que la división basal de los ciclos se forma en condiciones que favorecen la relativa preservación de materia orgánica en el sedimento y al mismo tiempo la existencia de vida bentónica. Es, por tanto, necesario admitir la existencia de oxígeno molecular en las aguas profundas durante el desarrollo de la división basal, pero en una cantidad tal que no permite la total oxidación de la materia orgánica, ya sea debido a una circulación y mezcla vertical restringida, o una elevada productividad.

Al iniciarse el depósito del sapropel las condiciones sobre el fondo pasan a ser anóxicas y todo el oxígeno molecular disuelto en las aguas es sustituido por sulfhídrico. Este fenómeno, por una parte, elimina la actividad bentónica, tal como se observa por los tubos orgánicos rellenos de pirita, y de otra, favorece la total preservación de la materia orgánica.

El sapropel está formado por una alteración de finas láminas de lodos calcáreos y lodos terrígenos. Los lodos calcáreos pueden llegar a estar constituidos en un 100 por ciento por caparazones de nanoplancton. La sedimentación varvada puede atribuirse, muy probablemente, a períodos estacionales de afloramiento de las aguas profundas. Estas han acumulado durante largos períodos nutrientes (fosfatos, nitratos y silicatos) y permiten la rápida proliferación (bloom) del plancton en los niveles superficiales. Los caparazones de estos organismos al morir dan lugar al depósito de los delgados lechos calcáreos. El mismo fenómeno ha podido favorecer la acumulación de fosfatos (en la forma de esqueletos y aragonito) y sedimentos silícicos (diatomeas, radiolarios y silicoflagelados). Estos últimos se hallan frecuentemente en asociación con los sapropeles.

El análisis cromatográfico de la materia orgánica del sapropel revela, amén de un origen marino, que no se trata de material de origen continental, transportado a la cuenca en función de un incremento en la erosión y descarga fluvial. Esta observación, junto a la abundancia de sulfuros de hierro (pirita y marcasita) en el sedimento, confirma que la formación de sapropel se debe a una respuesta oceanográfica y no a una dilución por materias originadas en el continente o la plataforma continental.

La capa de sedimentos anaranjados sobre el sapropel señala el retorno a las condiciones de mezcla vertical y oxigenación de las aguas del fondo. Durante los períodos de estratificación se favorece la acumulación de Mn^{++} y Fe^{++} en las aguas de pH bajo, por debajo del límite de densidad. La advección y difusión vertical transfiere estos iones a través de la superficie de estratificación donde precipitan en la forma de manganosiderita. Estos minera-



EL MEDITERRANEO se encuadra en el contexto de las cadenas alpinas de plegamiento (*azul*). Es patente la continuidad de las cadenas de plegamiento en tierra y mar, existiendo cuencas internas a dichas cadenas (algero-balear y tirrena) y cuencas externas, localizadas en sus márgenes (jónica y mar de Levante). En el mapa se registran macizos hercinianos (*marrón*), cuencas sedimentarias del Terciario (*amarillo*), cuencas salinas (*amarillo con líneas rojas*), cuencas sedimentarias del Neógeno superior (*gris*), cabalgamientos y zonas de subducción (▲▲), fracturas (– – –) y fallas y alineaciones estructurales (∼).

les se hunden en las aguas profundas donde se disuelven de nuevo y el ciclo se reanuda. Estos minerales pueden acumularse, no obstante, cerca de la superficie de densidad. La distribución más o menos regular en grandes sectores de la capa de sedimentos anaranjados, cuyo color debe atribuirse a la relativa abundancia de estos elementos (Mn y Fe), sugiere un proceso particular. Este podría haber sido condicionado por un rápido descenso de la superficie de densidad, lo que origina una precipitación masiva, sobre extensos sectores, de los elementos previamente en disolución en las aguas anóxicas.

La división superior del ciclo está caracterizada por su bajo contenido en materia orgánica, alto contenido en carbonatos y la total bioturbación del sedimento. Durante la formación de estos sedimentos, la cantidad de oxígeno molecular en las aguas del fondo es superior al requerido para la oxidación de la materia orgánica del plancton y la intensa actividad bentónica. Puesto que cada átomo-gramo de materia orgánica requiere 1,3 moléculas de oxígeno para su oxidación, se puede calcular el ritmo mínimo con que el oxígeno se suministra a las aguas profundas, a partir de la productividad primaria del Mediterráneo. Cálculos análogos pueden establecerse para determinar el espacio de tiempo requerido en eliminar el oxígeno molecular de las aguas profundas durante períodos de estratificación.

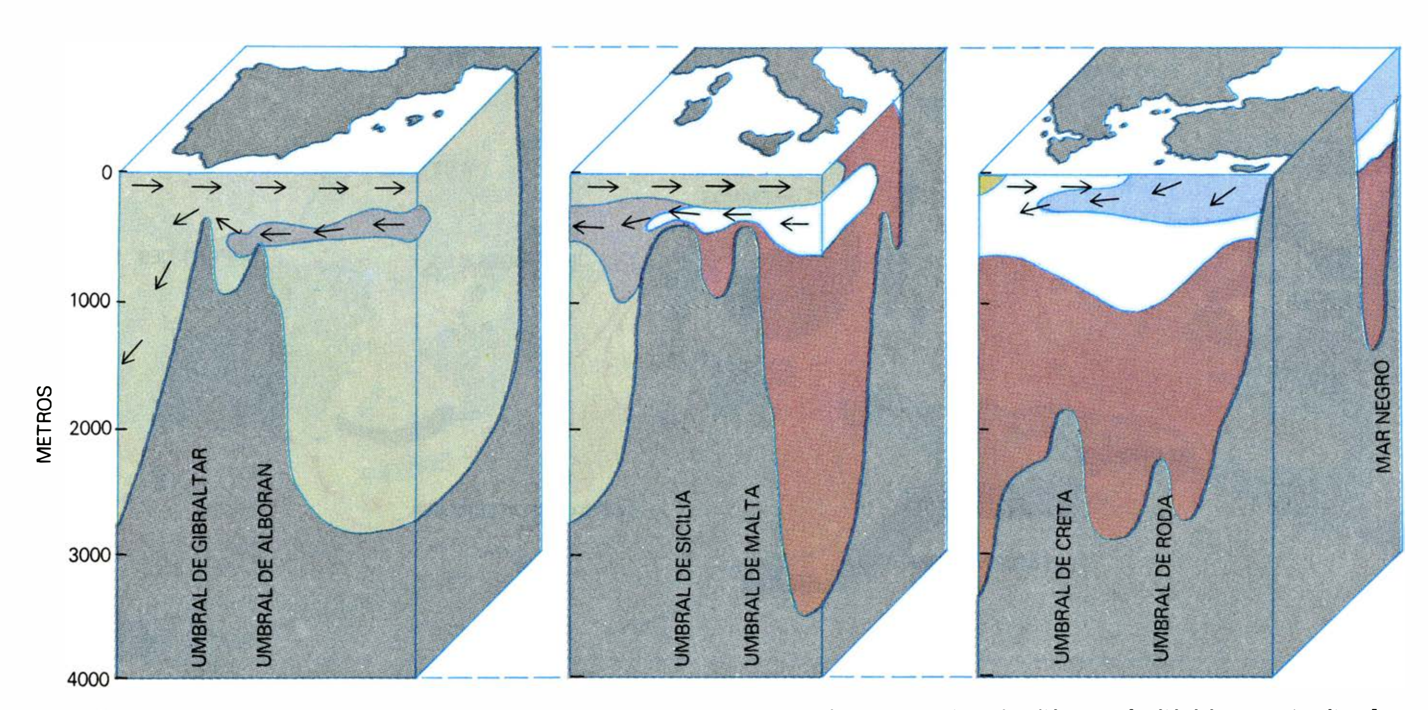
La mineralogía de los carbonatos en los sedimentos profundos aporta datos adicionales. Los componentes carbonatados dominantes en los sedimentos oceánicos son fragmentos de foraminíferos y cocolitos, y la mineralogía resultante es casi totalmente calcita. El aragonito abunda sólo en áreas de elevada productividad de pterópodos. El mar Rojo, por el contrario, es un caso particular caracterizado por salinidades y temperaturas considerablemente más altas que las de los océanos normales. El resultado es que los carbonatos más abundantes son calcita magnésica, probablemente precipitada inorgánicamente. Durante períodos pasados en este mar, con salinidades aún más elevadas que las presentes, el aragonito reemplaza, como principal componente carbonatado, a la calcita magnésica.

El Mediterráneo oriental representa un caso intermedio, en cuanto a salinidades y temperatura. Así, en los lodos calcáreos, se encuentran a diferentes niveles capas caracterizadas por un elevado contenido en calcita magnésica, alternando con otras formadas por calcita. Localmente aparecen también niveles ricos en aragonito y dolomita, posiblemente de origen autígeno. Ello implica el desarrollo de condiciones periódicas en las aguas del Mediterráneo que han sido más próximas a las del mar Rojo que a las de los océanos abiertos. La concentración de los niveles calcáreos ricos en calcita magnética en la división superior del ciclo, y su ausencia en las dos divisiones basales, acotan en el tiempo los períodos durante los cuales se pudieron alcanzar estas condiciones.

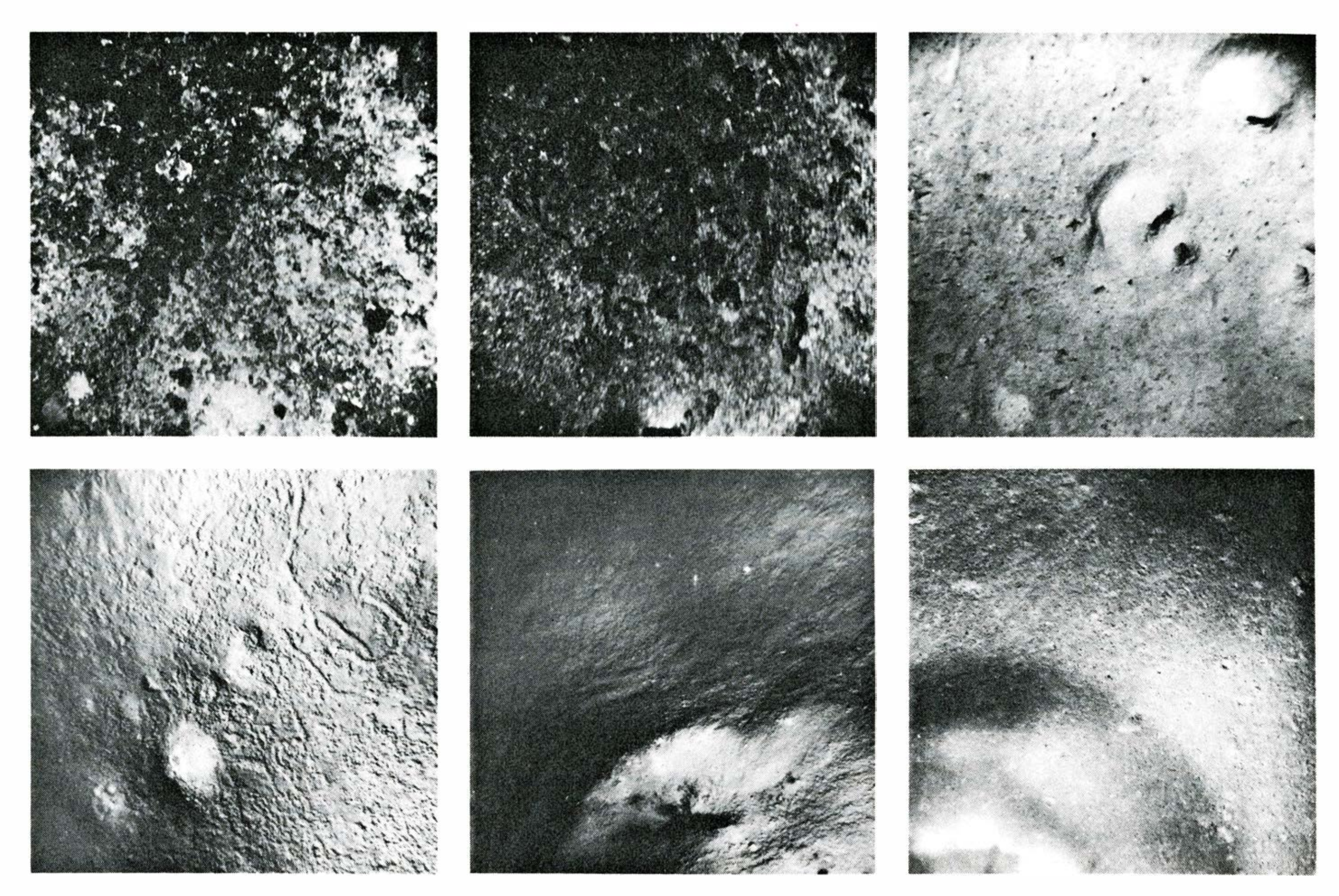
Hay otras líneas de prueba de las variaciones en salinidad y temperatura de las aguas del Mediterráneo. La información más abundante procede del análisis estadístico de los foraminíferos planctónicos contenidos en los sedimentos y del estudio geoquímico de los isótopos estables del oxígeno y carbono en estos microfósiles.

Las curvas de foraminíferos planctónicos se establecen a partir del cálculo cuantitativo de especies indicadoras de temperatura o salinidad, y de la determinación de su variabilidad vertical a lo largo de un testigo. Entre las especies comúnmente atribuidas a aguas frías, en el Mediterráneo se ha estudiado la distribución de *Globigerina bulloides,* mientras que *Globigerinoides ruber* se considera el mayor contribuyente a las especies de aguas cálidas. Otras especies, tal como *Globigerina eggeri* (*Neogloboquadrina dutertrei* de algunos autores), han sido utilizadas como indicadoras de baja salinidad. La diversidad faunística se ha empleado asimismo como indicadora del grado de estratificación de las masas de agua y cambios climáticos: la diversidad aumentaría durante períodos cálidos de mezcla vertical y decrecería en los períodos fríos, para llegar a ser mínima durante las fases de estratificación. No ha podido comprobarse, sin embargo, una relación lineal.

Las observaciones realizadas coinciden en señalar la correlación existente entre las capas de sapropel, o los sedimentos a éstas asociados, y la abundancia de *G. eggeri.* Ello implica un descenso de la salinidad de las aguas superficiales durante su depósito. Asimismo, se ha establecido que los sapro-



REGIMEN ACTUAL de circulación en el Mediterráneo, que puede considerarse como un "motor térmico", movido por un exceso de evaporización con respecto al influjo de agua. El agua de procedencia atlántica en Gibraltar es compensada por una corriente de salida en profundidad de agua más salina. Los colores reflejan la salinidad: verde claro, menos de 38,5 por mil; verde grisáceo, 38,5; marrón, 38,6; azul claro, 38,7 y, azul obscuro, más de 39,0 por mil.



LA ACTIVIDAD BIOLOGICA se observa actualmente a todas las batimetrías sobre los sedimentos superficiales del Mediterráneo. Esta se caracteriza por diversos tipos de sedimentos biogénicos en las plataformas someras: algas coronarias y acumulaciones de conchas de moluscos (*arriba, izquierda y centro*) y trazas de organismos en los sedimentos más profundos (*resto*). El tipo e intensidad de la actividad sobre el fondo varía con la profundidad; en general, decrece desde la zona batial (*arriba, a la derecha*) a las cuencas intermedias (*abajo, izquierda y centro*), y finalmente hasta las cuencas abisales (*abajo, a la derecha*).

peles no se desarrollan durante los extremos climáticos, sino durante la fase de incremento de temperatura previa a un período interglacial. Para algunos autores, los sapropeles también se formarían durante el período de descenso climático post-interglacial.

Las asociaciones de foraminíferos en los diversos sapropeles no siempre presentan las mismas características, y estas variaciones son mucho más importantes cuando se comparan las faunas que viven a diferente profundidad en la columna de agua. Todo ello implica que el mecanismo de formación de sapropel puede no ser uno sólo, habiéndose formado cada sapropel en función de condiciones particulares, pero en cualquier caso asociadas a un descenso de la salinidad superficial.

La composición de los isótopos del oxígeno, contenidos en las conchas calcáreas de los foraminíferos, se utiliza para el análisis de paleotemperaturas. Dicho método está basado en el hecho que, cuando se encuentra en equilibrio termodinámico, la calcita y el agua marina difieren en sus relaciones O^{18}/O^{16}, disminuyendo esta diferencia paralelamente al incremento de temperatura. Las conchas calcíticas formadas en equilibrio están enriquecidas en O^{18} en relación al agua marina. La temperatura de precipitación se deduce, a partir de la composición isotópica, por medio de ecuaciones empíricas. Estas ecuaciones contienen algunos factores que deben ser postulados cuando se aplican a tiempos pasados, y ello implica un cierto límite de incertidumbre. Dichos factores están influidos por variaciones debidas al "efecto glacial" y fluctuaciones en el balance de evaporación. En el Mediterráneo se deben considerar además los cambios isotópicos introducidos por variaciones en la precipitación y dilución local de las aguas.

El efecto glacial consiste en la separación selectiva del O^{16} de las aguas de los océanos durante épocas glaciales, cuando agua isotópicamente ligera se acumula en forma de hielo sobre el continente. Un exceso de evaporación produce el mismo resultado enriqueciendo el agua marina en O^{18}, al mismo tiempo que aumenta la salinidad. Todos estos factores son aditivos y el cálculo final del cambio de temperatura de formación de dos muestras diferentes sólo se estima en sus valores máximos.

El empleo de esta técnica ha permitido establecer en diversos océanos una curva isotópica generalizada, a partir de testigos continuos, aplicable al Cuaternario. En ésta se reconocen varios estadios, numerados pares (períodos glaciales) e impares (períodos interglaciales) de arriba abajo.

Para el Mediterráneo han sido establecidas curvas de isótopo del oxígeno por varios grupos de investigadores. El método seguido consiste en la selección de una o varias especies de foraminíferos, en función de una amplia distribución estratigráfica o de un hábitat vertical limitado en la columna de agua. La curva isotópica se construye a partir del análisis de muestras (con unos 0,5 mg de peso) monoespecíficas de foraminíferos, tomadas en los testigos a intervalos regulares de unos 10 a 20 cm. De entre las especies que viven en la capa superficial de agua (0-30 metros), se ha seleccionado frecuentemente *Globigerinoides ruber*, mientras que de las especies encontradas más abundantemente en la capa intermedia (50-100 m) se han analizado *Globigerina bulloides* y *Globorotalia inflata*, entre otras.

La amplitud de las variaciones isotópi-

cas en el Mediterráneo pone de manifiesto cambios de temperatura del agua del mar en el rango de 3 grados C a 8 grados C durante el Cuaternario. Estas estimaciones se refieren a valores máximos en el $\Delta\delta t$, suponiendo el cambio isotópico debido sólo al efecto de temperatura, dado que las variaciones isotópicas producidas por aguas de más baja salinidad son aditivos a los ocasionados por aguas más cálidas y, en ambos casos, conducentes a un decrecimiento del δO^{18}. En las capas de sapropel se observa una disminución en δO^{18}, del orden de 1,5 a 2,8 por mil, en los foraminíferos epipelágicos con respecto a los mesopelágicos del mismo nivel. Esta observación da cuenta del desarrollo de una estratificación por densidad durante el período de formación de los sapropeles, ya sea debido a aguas superficiales más cálidas o de más baja salinidad que las aguas intermedias.

Con respecto a la localización de los sapropeles dentro de la curva isotópica, los resultados obtenidos coinciden con los correspondientes a las curvas de foraminíferos. Es decir, estos niveles se desarrollarían en períodos de cambio climático, fundamentalmente durante los tramos de ascenso climático y, quizás, en los de enfriamiento. No obstante, la fuerte señal isotópica negativa de algunos niveles de sapropel enmascara estos resultados.

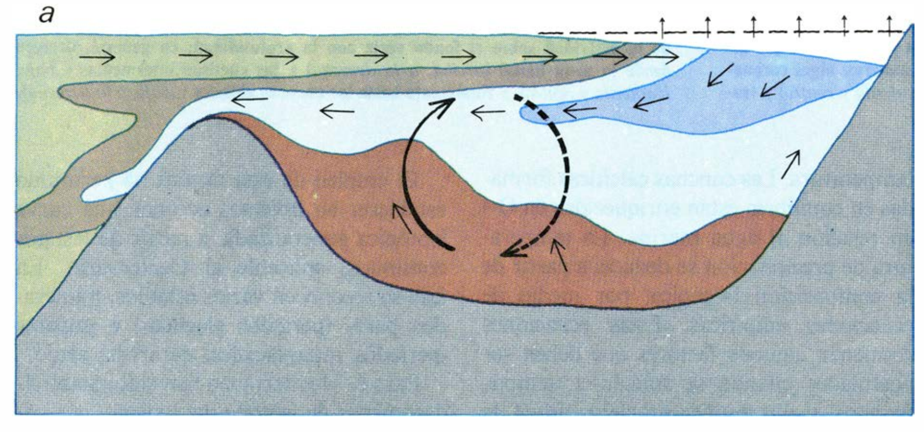
La sucesión estratigráfica de los depósitos profundos del mar Mediterráneo oriental es bien conocida, gracias a la existencia de numerosos horizontes que pueden ser correlacionados, por lo menos a escala de la cuenca. Como horizontes guía se han utilizado frecuentemente los niveles de sapropel y delgados lechos de cenizas volcánicas, correspondientes a erupciones de edad bien conocida. Excepto en áreas afectadas por condiciones especiales (fuertes índices de sedimentación o erosión), estos niveles permiten correlacionar testigos continuos situados a varios cientos de kilómetros de distancia. Cuando las condiciones locales han impedido o enmascaran el depósito de los niveles guía, la correlación es posible por medio del empleo combinado de varios indicadores estratigráficos. En especial, los ciclos sedimentarios, que toman en consideración todos y cada uno de los diferentes niveles, han demostrado ser de gran utilidad.

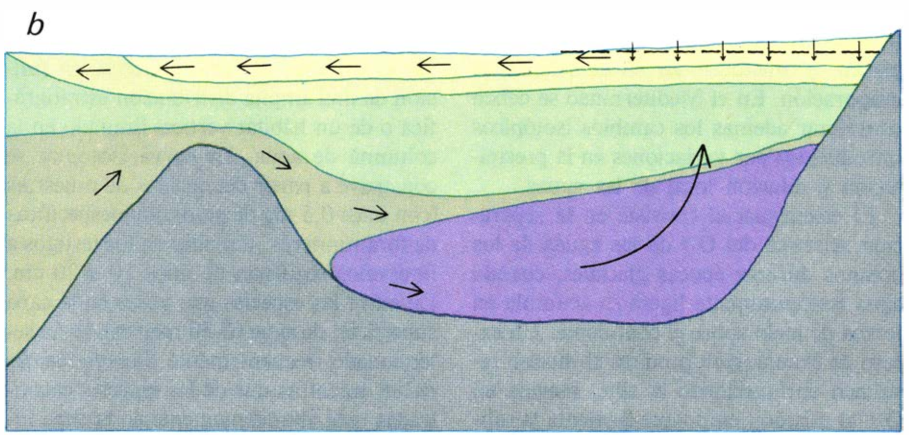
Los problemas más importantes se centran en la interpretación cronológica de los diferentes niveles. Las técnicas empleadas a este fin se pueden clasificar en dos grandes grupos. Uno se basa en el establecimiento de curvas paleoclimáticas de frecuencia de foraminíferos y de isótopos del oxígeno, complementadas en algunos casos con datos paleomagnéticos; aquéllas se correlacionan con otras curvas paleoclimáticas generalizadas de datación absoluta establecida. El segundo grupo utiliza la datación radiométrica absoluta, por radiocarbono o uranio-torio, de niveles estratigráficos de gran distribución regional.

Se han comparado las curvas de paleotemperatura determinadas sobre testigos del Mediterráneo oriental con las suministradas por testigos del Caribe, Atlántico norte y Pacífico ecuatorial, encontrándose grandes similitudes. Estas curvas han permitido reconocer hasta el estadio isotópico 15 de Emiliani, e independientemente han sido establecidas otras curvas faunísticas en las que se han reconocido unos 17 estadios de foraminíferos. Esta estratigrafía se extiende por debajo de la localización del horizonte de extinción de *Pseudoemiliania lacunosa,* el cual ha sido establecido próximo a la base del estadio isotópico 12, al que se le ha asignado en base a diversas correlaciones una edad 375.000 años antes de la actualidad en el Mediterráneo oriental. Sobre las mismas correlaciones, la base de los testigos más largos, tomados de áreas con bajo índice de sedimentación, llega a penetrar el límite entre las épocas de polaridad magnética normal Brunhes y la inversa Matuyana, datado en unos 700.000 años antes de la actualidad.

La asignación de edad de los diferentes niveles, y muy especialmente los de sapropel, presenta varios problemas en función de la técnica empleada y de las extrapolaciones requeridas. El método de datación absoluta por medio de radiocarbono puede ser considerado como el más preciso y que implica el número menor de postulados. El peor inconveniente de este método se centra en que sólo es utilizable con una cierta precisión entre la actualidad y entre hace unos 25.000-30.000 años. Más allá de esta edad, la cantidad de radiocarbono en la muestra se encuentra en el límite de detección, por lo que los resultados son poco fiables.

En base a esta técnica, la capa de sapropel 1, la más superior ha sido frecuentemente datada entre unos 7000 y 9000 años antes de la actualidad (a.a.). Más recientemente, nuestros estudios en el área del cono submarino del Nilo han dado edades de 23.000-25.000 años a.a. para el sapropel 2, y de 38.000-> 40.000 años antes de la actualidad para el sapropel 3. Las dataciones radiométricas con uranio-torio (U/Th) dan edades mucho mayores. En base a este método, el sapropel 2 ten-





MODELOS DE CIRCULACION de las aguas en mares adyacentes desarrollados bajo condiciones de climas árido y húmedo. El primer caso (*a*) representa la circulación actual del Mediterráneo, en el que hay una mezcla vertical y oxigenación de las aguas profundas. El segundo modelo (*b*), tal como por ejemplo en el mar Negro, hay estratificación de las masas de agua y desarrollo de condiciones anóxicas sobre el fondo.

dría una edad de 65.000 años, que se sitúa en el límite superior de precisión de la técnica U/Th, siendo además poco real según consideraciones sedimentológicas y estratigráficas.

La datación con radiocarbono de las capas calcáreas que forman la división superior de los ciclos han suministrado edades coherentes. La capa calcárea superior tiene una edad inferior a 3000 años. La capa calcárea 2, que forma el techo del segundo ciclo, ha sido datada en 17.000-19.000 años, aunque asimismo han sido obtenidas edades ligeramente superiores que podrían representar un subnivel de esta capa. El techo del tercer ciclo, capa calcárea 3, suministra una edad de 28.000-33.000 años.

Las dataciones asignadas a estas mismas capas, a partir de las curvas paleoclimáticas de foraminíneros e isótopos del oxígeno, invariablemente son superiores en varios órdenes de magnitud a las obtenidas con radiocarbono. Estas dataciones sobre curvas paleoclimáticas, sin embargo, han sido frecuentemente discutidas, al implicar numerosas extrapolaciones, y el admitir correlaciones realizadas incluso a escala global.

El conocimiento de la distribución en el Mediterráneo de los dos tipos de sedimentos que implican unas condiciones ambientales específicas (sapropeles y lodos calcáreos) es fundamental para la interpretación de la evolución de las diferentes cuencas.

Los sapropeles se encuentran en testigos tomados al este del estrecho de Sicilia, por debajo de unos 700 metros de profundidad. Los testigos situados entre 550 y 700 metros contienen delgados niveles de sedimentos obscuros que muestran pruebas de una reducción parcial, debiendo establecerse el límite superior de la zona anóxica a estas profundidades. Sin embargo, no se puede excluir incursiones a niveles más someros de las aguas carentes de oxígeno, pero los depósitos bajo ellas formados han debido ser muy delgados y posteriormente mezclados por la actividad bentónica.

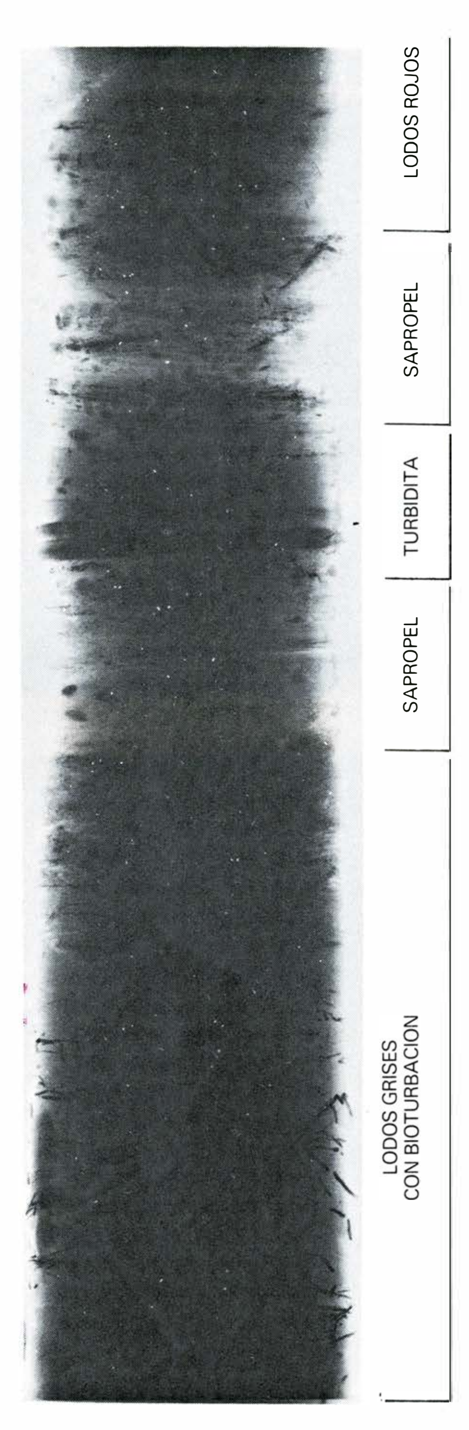
Las cuencas profundas del estrecho de Sicilia tienen un interés especial. Efectivamente, el fondo de estas cuencas está a profundidades muy superiores a las de formación de los sapropeles en la inmediata cuenca jónica. Ello implica que el umbral oriental del estrecho de Sicilia ha bloqueado la salida de las aguas profundas del Mediterráneo oriental. Además, las condiciones oceanográficas en el estrecho han posibilitado la mezcla vertical y oxigenación de las aguas profundas.

Los sapropeles no se encuentran en el Mediterráneo desde el umbral oriental del estrecho de Sicilia hacia el oeste. No obstante, en determinados sectores de la cuenca algero-balear el análisis de testigos ha puesto de manifiesto la existencia de capas obscuras, conchas piritizadas de organismos y cambios en el tipo de bioturbación. La datación de estos niveles demuestra que se desarrollaron al mismo tiempo que los sapropeles, lo que implica alteraciones importantes de las condiciones oceanográficas ocurridas simultáneamente en toda la cuenca mediterránea.

Los lodos calcáreos, al contrario que los sapropeles, se han muestreado tanto en el Mediterráneo oriental como en el occidental. La edad de estos niveles es asimismo comparable en las dos cuencas, al menos para los tres niveles superiores. Dado que estos depósitos requieren unas condiciones particulares de formación (mayor temperatura y salinidad de las aguas), esta observación confirma la existencia de cambios oceanográficos simultáneos en todo el ámbito mediterráneo.

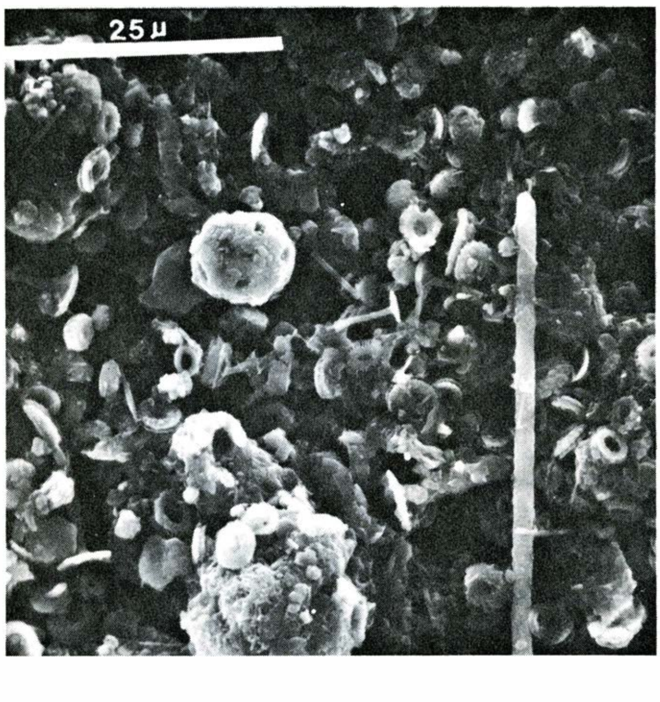
¿Cuál es el significado de esta sedimentación alternante y en función de qué factores se controla? Cualquier modelo que se proponga debe explicar las siguientes observaciones: (1) naturaleza cíclica de la sedimentación; (2) presencia de sapropel en las cuencas orientales y de capas obscuras en las occidentales; (3) formación simultánea de lodos calcáreos en todo el ámbito mediterráneo; (4) existencia de condiciones anóxicas en las aguas del fondo durante el depósito del sapropel. Estas observaciones están fuertemente fundamentadas y son ampliamente admitidas. Sin embargo, hay otra serie de aspectos que implican un mayor grado de interpretación y sobre los cuales no existe acuerdo general. Estos incluyen cuestiones tan fundamentales como: (*a*) datación absoluta de los diferentes niveles; (*b*) condiciones de salinidad y temperatura de las masas de agua durante la fomación del sapropel y lodos calcáreos; (*c*) relación de estos depósitos con las curvas climáticas y cambios eustáticos; (*d*) causas de la estratificación en las masas de agua. Estos diferentes puntos, objeto de controversia, son sucesivamente discutidos a continuación.

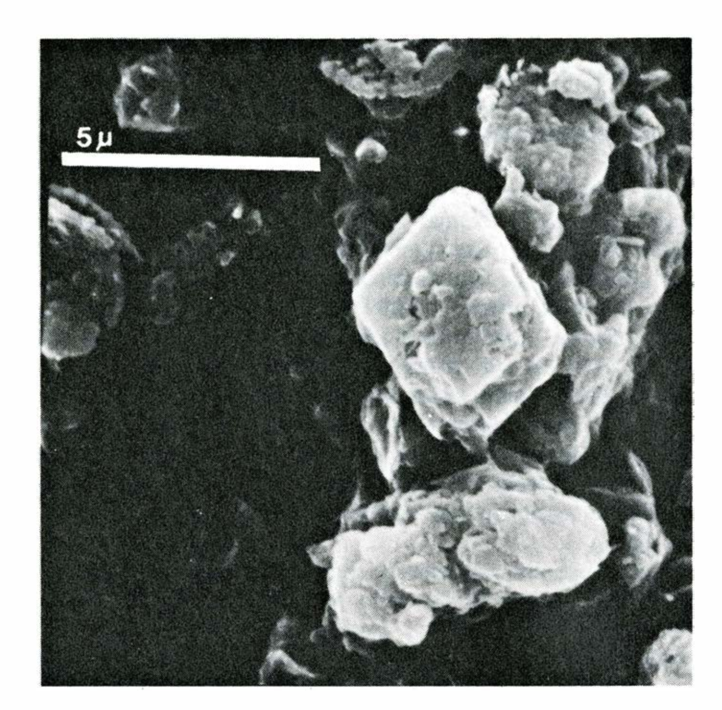
La correlación de testigos en base al establecimiento de curvas climáticas de isótopos y de foraminíferos, confirma las interpretaciones litológicas. No obstante, su encuadre dentro de una determinación de edad absoluta no se ha realizado aún. Las dataciones de estas curvas se efectúan a partir de su semejanza con curvas climáticas establecidas en otros mares (Caribe, Atlántico norte y Pacífico ecuatorial). El problema fundamental estriba en estas correlaciones, pues, incluso dentro del Mediterráneo oriental, no todos los autores coinciden en una misma interpretación de curvas paleoclimáticas obtenidas a veces sobre los mismos testigos.

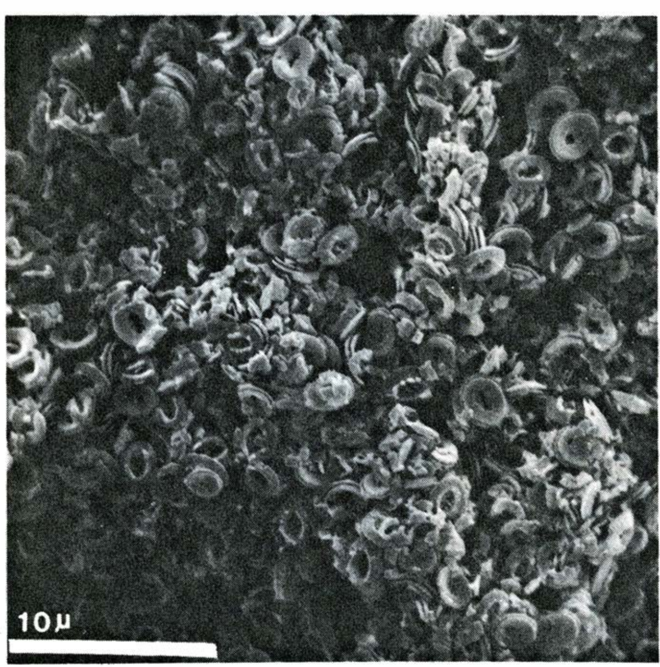


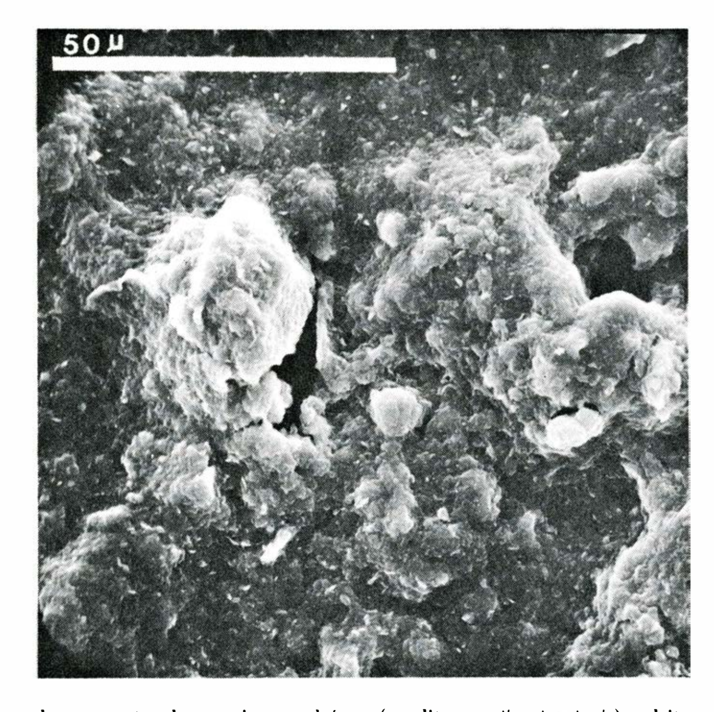
RADIOGRAFIA (rayos X) de un testigo continuo mostrando la fina laminación horizontal del sapropel (*zona central*) no alterada por actividad bentónica, mientras ésta (tubos negros) se aprecia en los niveles inferiores que han sido verticalmente mezclados. La actividad biológica sobre el fondo es eliminada coincidiendo con el inicio del desarrollo de sapropel.

Por otra parte, el mayor número de dataciones radiométricas han utilizado la técnica del radiocarbono, que es aplicable a un intervalo de tiempo relativamente corto. El número de muestras datadas con U/Th es mucho más limitado. Además, entre el límite de edad superior de preci-









LOS DOS TIPOS DE SEDIMENTOS más característicos del Mediterráneo oriental aparecen en estas fotografías de microscopio electrónico. Implican unas condiciones ambientales diferentes para su desarrollo: lodos calcáreos, constituidos por restos de organismos calcáreos (cocolitos; *arriba, izquierda*), calcita magnésica (cristales irregulares; *arriba, derecha*), sapropel formado por láminas alternantes de cocolitos (*abajo, izquierda*) y lodos terrígenos (*abajo, derecha*).

sión de esta técnica y el de edad inferior del radiocarbono existe un lapso de tiempo notable. Cuando se comparan índices de sedimentación en un mismo testigo, se encuentra una inflexión entre los resultados de los niveles superiores, calculados a partir de datación con radiocarbono, y los de la parte inferior del testigo, basados en la datación con U/Th. Ello implica quizá que estas dos técnicas no suministran dataciones comparables o con el mismo grado de precisión.

Al objeto de acotar estas limitaciones en este trabajo me limitaré a las dataciones obtenidas con radiocarbono, que presentan la indudable ventaja de ser mucho más numerosas y homogéneas en toda la cuenca mediterránea.

Los niveles de sapropel superiores se han desarrollado bajo condiciones que implican la formación de una capa superficial menos densa, caracterizada por una salinidad más baja (del orden de 2,5 por mil), aunque este efecto puede deberse en parte a un aumento de la temperatura (del orden de 6 grados Celsius). La oscilación máxima en la temperatura del agua superficial del Mediterráneo entre los períodos glaciares e interglaciares del Cuaternario es del orden de 3 grados C a 8 grados C.

Los lodos calcáreos ricos en calcita magnésica, requieren asimismo condiciones ambientales específicas, quizá como las existentes en la actualidad en el mar Rojo; es decir, alta salinidad y temperatura. No obstante, hasta el momento presente, su encuadre dentro del contexto paleoclimático no ha sido suficientemente considerado. El análisis de las curvas paleoclimá-

ticas de foraminíferos e isótopos publicadas del Mediterráneo, independientemente de su interpretación geocronológica, ponen de manifiesto que el desarrollo de las capas calcáreas coincide alrededor de los extremos climáticos, ya sean máximos o mínimos. Dentro de la curva generalizada de isótopos del oxígeno publicada por Emiliani para testigos profundos del Caribe, calibrada en edad absoluta sobre la desintegración radiométrica de Pa^{231} y T^{230} por Broecker y Van Donk, los tres niveles superiores de lodos calcáreos datados por radiocarbono están comprendidos entre los estadios isotópicos 3 y 1. Esta extrapolación confirma que el segundo nivel de lodos calcáreos se sitúa alrededor del estadio isotópico 2, correspondiente a un mínimo de temperatura, mientras que el nivel superior, por ejemplo, coincide sin duda con un estadio de mejoramiento climático.

Es más difícil establecer la naturaleza de las diferentes masas de agua durante el desarrollo de los lodos calcáreos. Estos generalmente coinciden, en las curvas de frecuencia de *G. eggeri,* tomada como indicador de baja salinidad, con bajos porcentajes de esta especie. Ello implica, al contrario que los sapropeles, altas salinidades de las aguas superficiales, confirmando los datos mineralógicos. Además, la existencia de una actividad bentónica mucho más activa en los lodos calcáreos señala la ausencia de estratificación permanente en la masa de agua. Las diferencias en la variación de temperatura y salinidad durante estos períodos, entre las diferentes masas de agua, han debido mantenerse dentro de un orden de magnitud próximo al actual, que para el agua profunda e intermedia del Mediterráneo oriental son de 1,8 grados C y 0,45 por mil, respectivamente.

A partir de las dataciones con radiocarbono y por correlación con la curva generalizada de isótopos del oxígeno, los tres niveles superiores de sapropel se forman durante fases de cambio climático. Resultados comparables se obtienen al encuadrar los diferentes niveles datados con radiocarbono en una curva eustática generalizada. (Se entiende por eustasia el movimiento a nivel mundial del nivel del mar.) Los sapropeles se localizan durante fases de cambio eustático, en proximidad a los estadios altos del nivel del mar. Por el contrario, los lodos calcáreos coinciden con máximos y mínimos eustáticos. El desarrollo de ciclos sedimentarios en las aguas profundas sigue muy de cerca esta evolución. Cada ciclo se inicia coincidiendo, aunque ligeramente desfasado en el tiempo, con un semiperíodo de cambio eustático y dura hasta el comienzo del siguiente semiperíodo.

Las incógnitas más importantes se presentan al establecer las causas que condicionan la estratificación de las masas de agua. La mayoría de las hipótesis propuestas relacionan la estratificación con un fuerte influjo de agua dulce, ya sea procedente de la fusión de los glaciares e introducida al Mediterráneo a través de los mares Adriático, Egeo y Negro, o influida por un cambio de las condiciones climáticas de fuertemente áridas a pluviales durante el paso del máximo glacial al interglacial. Una fuerte entrada de agua atlántica menos salina, acompañando el ascenso eustático, ha sido también invocada. Otros autores prefieren una estratificación termal, debido a un aumento notable en la temperatura del agua superficial, o un proceso climático que combina diferentes balances de evaporación y el influjo de agua dulce (precipitación más descarga fluvial). Esta última hipótesis implica además una estrecha correlación entre la formación de sapropel y la relación de cambio eustático.

La fuerte señal isotópica negativa que caracteriza a los niveles de sapropel no puede explicarse simplemente debido a un incremento de temperatura del agua superficial. Este fenómeno, junto al fuerte aumento de formas oligotípicas en los sapropeles, implica la introducción de agua isotópicamente más ligera, que produce una fuerte dilución de las aguas superficiales del Mediterráneo. Al mismo tiempo, se produciría un incremento del gradiente térmico entre las aguas superficiales e intermedias que bloquea la mezcla vertical.

Varios autores han sugerido que este agua superficial menos salina se origina en el mar Negro, entrando en el Mediterráneo oriental cuando el umbral de 40 metros del mar de Mármara es sobrepasado en una fase de ascenso eustático. Los cálculos sobre la base de la descarga actual del mar Negro y río Nilo (los dos mayores aportes de agua salobre y dulce al Mediterráneo oriental) reflejan que en condiciones óptimas se formaría una capa superficial salobre con 10 metros de profundidad como máximo. Es difícil imaginar que una capa tan delgada haya sido capaz de inhibir efectivamente la mezcla vertical.

El registro paleoclimático en las tierras emergidas suministra datos de gran validez. En un ciclo glacial completo, comprendido entre dos períodos interglaciales, se han definido tres estadios principales, caracterizado cada uno de ellos por ciertas condiciones de temperatura y humedad (precipitación). El primer estadio de deteriorización climática, denominado anaglacial, produciría un desplazamiento hacia el sur en la trayectoria de las tormentas principales, ocasionadas por los vientos predominantes del sur y sudoeste (westerlies). Esta deflexión meridional de los vientos procedentes del Atlántico, cargados de humedad, produciría un notable aumento de la precipitación en la generalidad del área mediterránea, incluyendo el norte de Africa. Un descenso de la temperatura atmosférica, quizás en el orden de 6-7 grados C para el norte de Africa, acompaña el fenómeno anterior. El estadio de glaciación máxima, pleniglacial, está caracterizado en los modelos climáticos por una región de altas presiones en el hemisferio septentrional y un flujo importante de aire en Europa central, inmediatamente al sur de los glaciares de Escandinavia-Siberia, procedente del este y noreste. Este régimen de circulación de aire seco, afectado por un descenso de la temperatura del aire superficial en el área mediterránea de 6-9 grados C, lleva a condiciones de aridez en el ámbito mediterráneo, las cuales han podido ocurrir sobre extensas áreas de la tierra. La transición del máximo de glaciación al interglacial, estadio cataglacial, está registrada en muchas partes del mundo (lago Victoria en Africa, lago Bonneville en Norteamérica, lago Balatan en Europa sur-oriental) por un notable incremento de la precipitación y el progresivo aumento de la temperatura.

Estos cambios no sólo han alterado las condiciones climáticas del Mediterráneo, sino que, además, han producido marcadas fluctuaciones en la cuenca de escorrentía de los principales ríos. Así el Nilo Blanco, por ejemplo, fue casi desecado cuando el nivel de base en el lago Victoria durante el pleniglacial, se encontraba tan bajo como para impedir el flujo a través de las cataratas de Murchison. El resultado de todos estos fenómenos se concentra para producir notables alteraciones en los balances de evaporación y descarga de agua dulce en el Mediterráneo, que cambian periódicamente la salinidad y temperatura de las masas de agua.

Podemos ya establecer un modelo dinámico que explique la formación de los diferentes tipos de depósitos profundos del Mediterráneo durante el Cuaternario superior. Partiendo de una situación interglacial, análoga a la presente, se puede reconstruir esta evolución.

Durante fases interglaciales, el régimen de circulación en el Mediterráneo corresponde a la situación de "motor térmico", movido por el exceso de evaporación y regulado en Gibraltar por el aporte de agua menos salina del Atlántico. El agua superficial, que progresivamente aumenta la salinidad hacia el este, se hunde en la cuenca oriental para formar el agua intermedia, que fluye hacia el oeste, y el agua pro-

funda. En estas condiciones, la mezcla vertical de las masas de agua está bien establecida, excepto algunos meses de verano, y el oxígeno molecular suministrado al fondo permite una intensa actividad bentónica. Durante determinadas épocas, especialmente cálidas, se han debido formar aguas de más elevada salinidad y temperatura, que favorecen el depósito de los lodos calcáreos en todo el Mediterráneo, acompañados del gran desarrollo de calcita magnésica en la cuenca oriental.

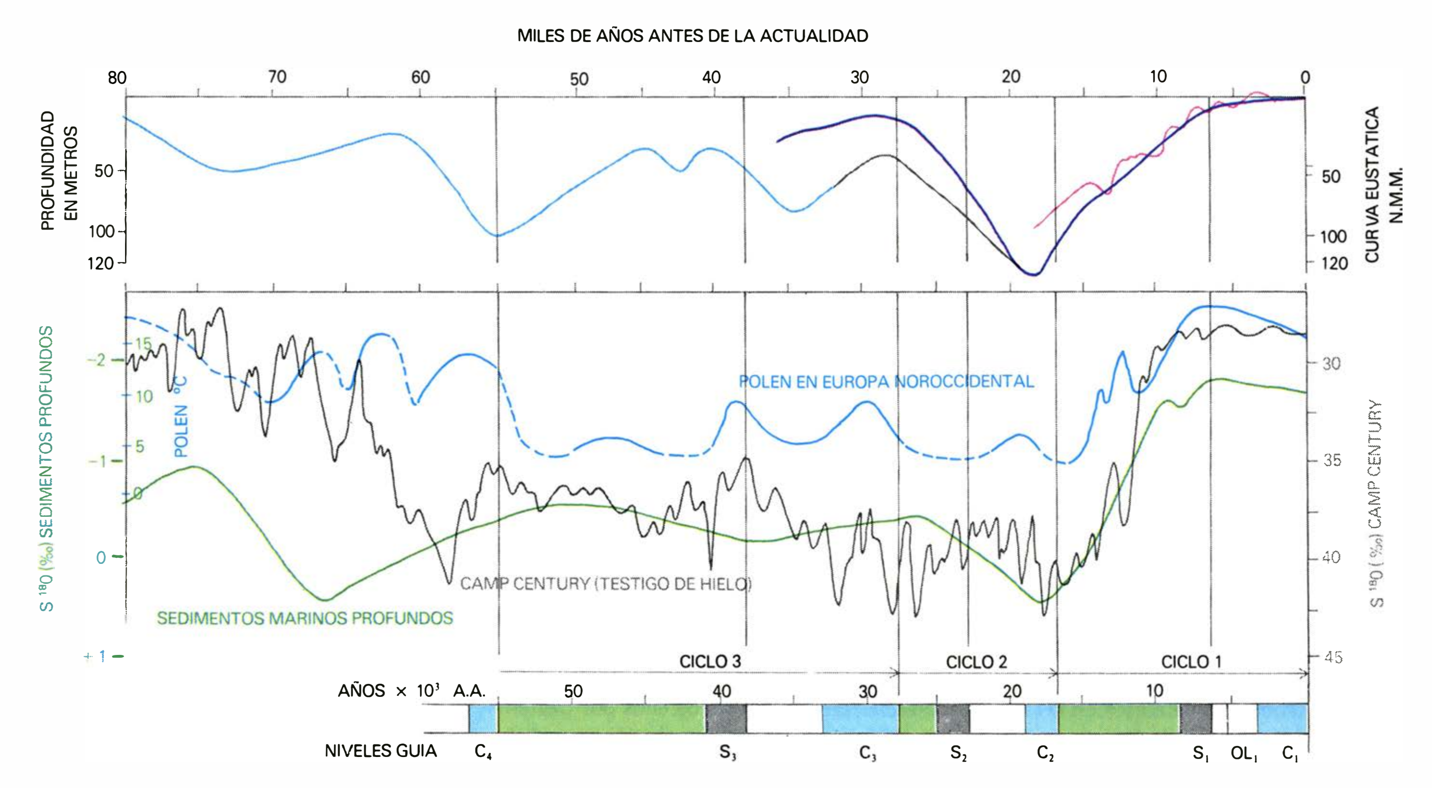
La situación se altera completamente en el paso hacia el estadio anaglacial. La progresiva deteriorización del clima, acompañada del aumento de pluviosidad, lleva a una gran inestabilidad de la cuenca, aumento de los aportes detríticos por descarga fluvial y progresivo descenso de nivel eustático. Durante esta fase, se produce el depósito de la división basal de lodos grises, tanto en el Mediterráneo oriental como en el occidental, iniciándose el desarrollo de un nuevo ciclo sedimentario. Durante el estadio anaglacial propiamente dicho, el fuerte aumento de la pluviometría y una temperatura del agua del mar aún relativamente elevada favorecen la estratificación de las masas de agua en la cuenca oriental, con la formación de condiciones anóxicas sobre el fondo. La vida bentónica, presente en la etapa anterior, desaparece totalmente. En la cuenca occidental, debido a una mayor facilidad de intercambio con el Atlántico, la estratificación es sólo parcial y se forma la fina capa de sedimentos obscuros. Cabe una inversión en el régimen de corrientes, al haber pasado el Mediterráneo de unas condiciones de mar adyacente bajo clima árido a clima húmedo.

El estadio pleniglacial está caracterizado por condiciones de aridez climática. El régimen de vientos secos y fríos facilita una evaporación importante, que aumenta la salinidad y decrece la temperatura, lo cual explica la fuerte señal positiva de isótopos pesados del oxígeno. Este fenómeno se ve favorecido por una comunicación reducida con el Atlántico, debido al descenso del nivel del mar en más de 100 metros, así como la disminución de la cuenca de escorrentía de los ríos (como el Nilo) y el cierre de la comunicación con el mar Negro. El Mediterráneo pasa a ser una cuenca casi aislada, que mantiene una comunicación precaria con el Atlántico a través del estrecho de Gibraltar.

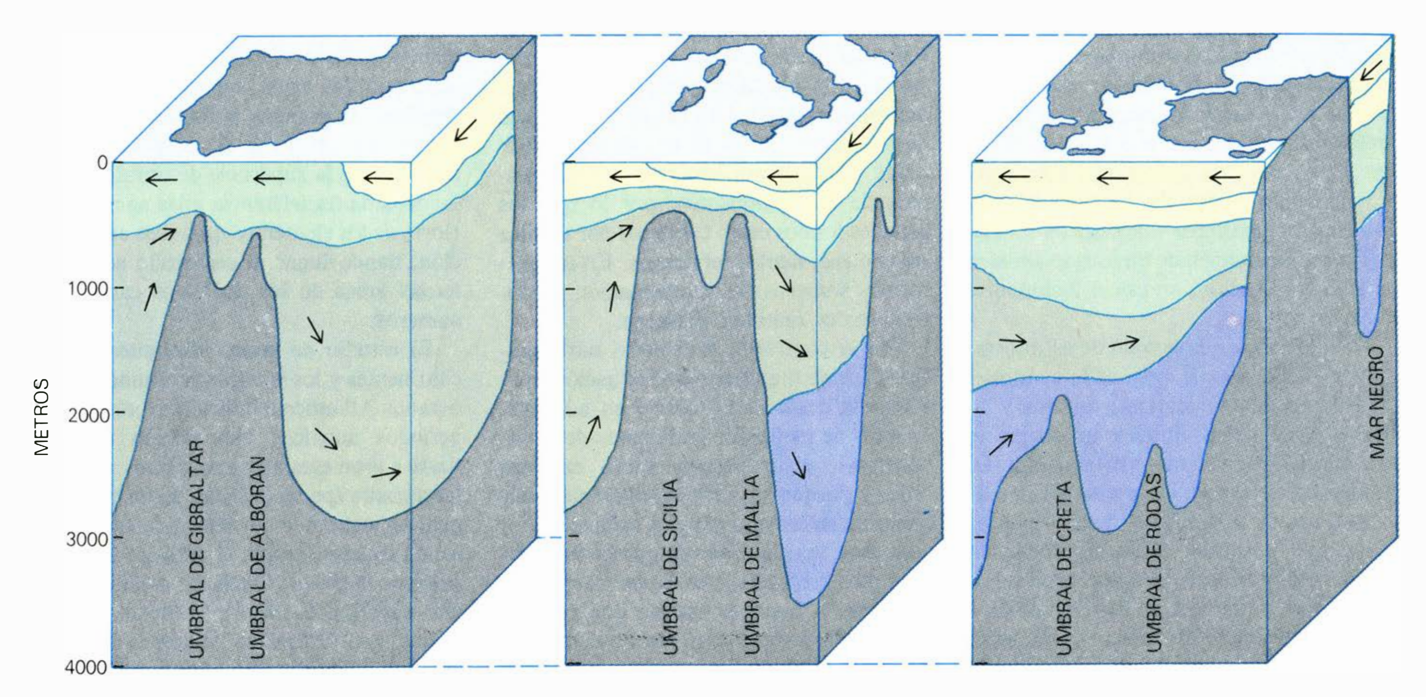
El aumento de salinidad del agua superficial genera un "motor salino", que favorece la mezcla vertical, el retorno de la actividad biológica sobre el fondo y el depósito de los lodos calcáreos, ricos en calcita magnésica. Durante este período, los sedimentos aportados por las corrientes fluviales se acumulan de una manera transitoria en la parte externa de la plataforma continental y el talud superior.

En el paso al estadio cataglacial la estabilidad de la cuenca es alterada. El ascenso del nivel del mar genera las condiciones para que una gran parte de los depósitos en equilibrio metaestable del talud superior y plataforma continental sean transportados a aguas profundas. El aporte de una gran cantidad de sedimentos ricos en materia orgánica de origen continental crea las condiciones que inician el agotamiento del oxígeno del fondo y la progresiva disminución de la actividad bentónica.

Durante el estadio cataglacial se producen notables cambios, verbigracia: importante aumento de la pluviosidad, acompañado de un incremento de la temperatura, establecimiento de la comunicación con el mar Negro, debido a sobrepasarse el umbral a 40 metros durante el ascenso eustático y desarrollo de la cuenca de escorrentía de los grandes ríos. El Mediterráneo pasa de nuevo a condiciones de clima húmedo. La salinidad del agua superficial decrece y aumenta la temperatura, produciéndose una marcada estratificación, que lleva a condiciones anóxicas en la cuenca oriental, y ventilación parcial de las aguas profundas en la cuenca occidental. Los sapropeles y lodos obscuros se forman en el ámbito de las diferentes cuencas mediterráneas, encontrándose de nuevo pruebas



ANALISIS COMPARATIVO entre la sucesión de los sedimentos del Mediterráneo oriental (columna inferior), datados absolutamente con radiocarbono, y las curvas eustáticas (gráfico superior) y paleoclimáticas (gráfico intermedio) generalizadas, establecidas a escala global. Nos permiten deducir las condiciones paleoambientales bajo las cuales dichos sedimentos fueron formados. Los sapropeles (niveles S; *en gris obscuro*) se forman bajo condiciones de cambio climático-eustático, mientras que los lodos calcáreos (niveles C; *en zul*) coinciden con los extremos climático-eustáticos. Los lodos grises aparecen en verde. Si atendemos debidamente al desarrollo cíclico de los sedimentos, observamos la coincidencia de éste con los cambios climático-eustáticos.



EL DEPOSITO DE SAPROPELES en las cuencas orientales del Mediterráneo, y el desarrollo de condiciones anóxicas sobre el fondo, probablemente coincide con una situación de inversión de corrientes. Esta situación corresponde a un modelo de mar adyacente al mar Negro, alcanzada durante unos cortos intervalos de tiempo. La graduación de colores establece las distintas propiedades del agua (cerca de la superficie, agua menos densa; en verde claro, agua oxigenada; en verde obscuro, agua parcialmente oxigenada y, en azul obscuro, agua profunda anóxica (sin oxígeno libre) y rica en sulfhídrico).

sedimentológicas de inversión de corrientes en la cuenca algero-balear y estrecho de Sicilia. Asimismo se producen cambios periódicos o estacionales que permiten el afloramiento de las aguas profundas ricas en nutrientes. Estas favorecen temporalmente una elevada productividad en grandes sectores de la cuenca, dando lugar al depósito rítmico de delgados lechos formados por restos de caparazones de organismos calcáreos o silícicos.

El final del período cataglacial está marcado por fuertes descensos de la superficie de densidad, lo que condiciona el depósito de los elementos metálicos (Fe^{++} y Mn^{++}) almacenados en las aguas profundas de bajo *p*H. Así se formaría la capa de lodos con vivo color rojo. A partir de este momento se instauran las condiciones oceanográficas actuales, características de los estadios interglaciales.

En el establecimiento del presente modelo se han tomado en consideración una serie de observaciones previamente omitidas o no discutidas suficientemente. De especial importancia es la ciclicidad de los depósitos y la existencia de fenómenos simultáneos en todo el ámbito del Mediterráneo.

Es importante asimismo señalar que este modelo propone inversión de corrientes en el Mediterráneo sólo durante cortos períodos de tiempo, de unos 2000 años, simultáneos con el desarrollo de los sapropeles. Ello implica un flujo superficial de aguas de procedencia atlántica durante todos los otros estadios del ciclo sedimentario y explica la corta presencia de *Coccolithus pelagicus*, probablemente de procedencia atlántica, en depósitos directamente por debajo y encima del sapropel. La desaparición de esta especie epipelágica en los restantes niveles donde debía encontrarse ha de atribuirse a su específica afinidad de temperatura.

Los ciclos sedimentarios desarrollados en función de este modelo, aunque equivalentes en sus distintas divisiones, presentan notables diferencias entre las cuencas orientales y occidentales. Además, los ciclos sucesivos tienen un desarrollo distinto, dado que se forman en diferentes fases del cambio climático-eustático.

¿Qué consecuencias de tipo sedimentario pueden deducirse del desarrollo de sapropeles en el Mediterráneo oriental? Los sondeos profundos del *Glomar Challenger* en el Mediterráneo oriental han puesto de manifiesto la existencia de dos docenas de niveles de sapropel formados durante los últimos 5 millones de años. Estos niveles, aunque poco regulares, llegan a alcanzar los 30 cm de espesor y presentan un contenido orgánico asimismo variable, desde algo más del 1 por ciento hasta más del 18 por ciento, promediando un 4 por ciento.

En términos de espesor y extensión superficial, se depositaron unos 2 metros de sapropel sobre un área de 500.000 kilómetros cuadrados en un intervalo acumulativo de unos 40.000 años, dentro del período más reciente de los últimos 200.000 años. Este volumen de material refleja un flujo neto de unos $1,6 \times 10^{12}$ gramos/año de carbono almacenado en el depósito sedimentario, en la forma de restos de animales fosilizados y fragmentados de plantas. El carbono es incorporado por los organismos para construir sus esqueletos carbonatados y sus tejidos vivos. Aproximadamente por cada átomo de carbono extraído de la atmósfera y del CO_2 y CO_3H^- oceánico como carbonato cálcico esquelético, dos átomos van a formar parte de la materia orgánica. En condiciones normales de oxigenación, la materia orgánica se recicla a la atmósfera despúes de la muerte del organismo debido a los procesos naturales. Pero en condiciones anóxicas esta materia orgánica queda almacenada en el registro fósil. El resultado de esta extracción de carbono oceánico es el aumento de calcio en disolución en relación a bicarbonato, y en consecuencia un descenso de la alcalinidad del agua marina. Paralelamente a la formación de sapropeles los organismos marinos no encuentran suficiente material para construir conchas esqueléticas masivas y las que se forman son de nuevo disueltas al hundirse en las aguas profundas.

El azufre elemental se almacena asimismo en los depósitos de sapropel en los muchos hábitos cristalinos de la pirita marcasita, y ocasionalmente como nódulos y venas de barita. Este fenómeno conduce a una característica disminución de sulfatos en los océanos anóxicos, si se considera que éstos no se suelen incorporar en

sedimentos marinos oxidados y que la mayor parte del sulfato suministrado al océano permanece en disolución. Así, el sulfato en los océanos actuales es el segundo anión más abundante, a continuación del cloro y en una proporción tres veces superior al catión calcio. En función de estos factores los depósitos evaporíticos formados por alimentación de un océano anóxico estarán enriquecidos en calcio y empobrecidos en sulfatos.

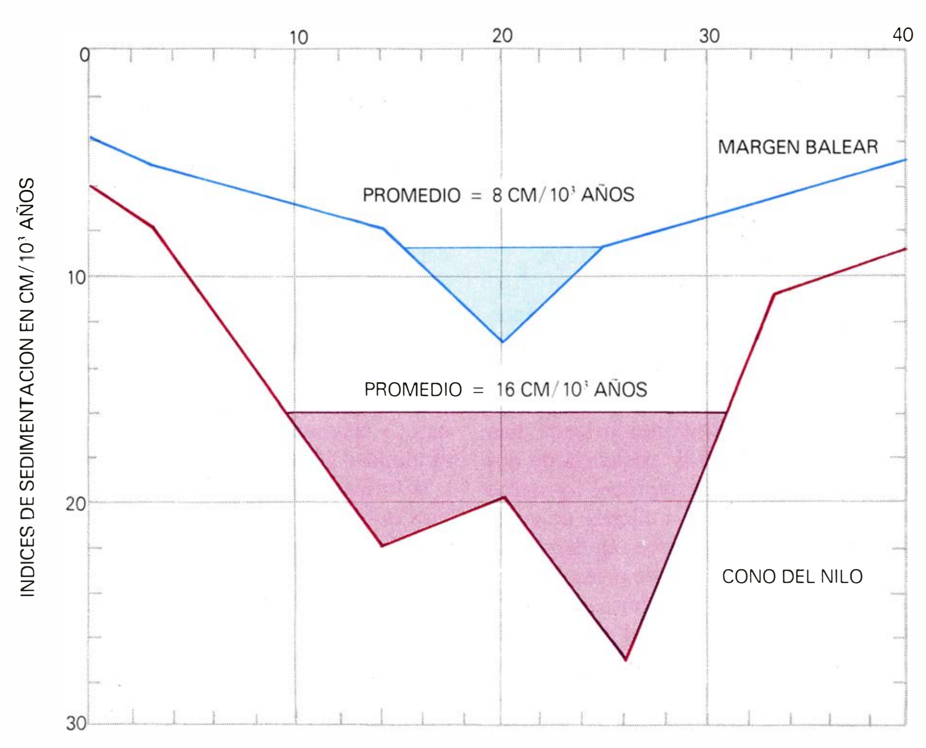
Otro efecto del desarrollo de estratificación en las masas de agua es la acumulación de nutrientes (fosfatos, nitratos y sílice) en las aguas profundas, los cuales no son reciclados hacia la superficie. Este fenómeno se ve favorecido por la pérdida de nitrato debido a la acción de las bacterias reductoras de nitrato. Al mismo tiempo en zonas de afloramiento de aguas profundas, cargadas en nutrientes, se han podido producir condiciones favorables a una gran fertilidad, que da lugar a la formación de depósitos fosfatados y silícicos.

El correcto conocimiento de los fenómenos sedimentarios en aguas anóxicas presenta asimismo un indudable interés para la interpretación del registro fósil. En los océanos modernos, la precipitación química de carbonato cálcico o dolomita es prácticamente despreciable. Los carbonatos marinos recientes son fundamentalmente de origen biogénico y su distribución en aguas profundas, en la forma de lodos de foraminíferos, cocolitos y pterópodos, esta regida por la profundidad de compensación de carbonatos. Por debajo de unos pocos miles de metros de profundidad, se disuelven los caparazones calcáreos de los organismos, por lo que los grandes fondos están cubiertos por arcillas rojas o sedimentos terrígenos. En los ambientes someros, la sedimentación predominante es tambíen terrígena.

Por el contrario, el registro estratigráfico pone de manifiesto una situación muy diferente desde el Cámbrico en adelante. Cientos de metros de carbonatos de aguas someras se distribuyen sobre extensas áreas y pueden seguirse las diferentes unidades individuales a grandes distancias. En contraste, los depósitos de geosinclinal generalmente empiezan en facies masivas de areniscas o pizarras negras, que parecen haberse depositado a grandes profundidades bajo condiciones anóxicas. Se debe concluir que los depósitos de los océanos actuales parecen no tener muchas afinidades con los sedimentos marinos antiguos.

En tales casos hay que invocar un océano estratificado en el que las aguas profundas anóxicas facilitarían el depósito de las pizarras negras y series terrígenas e impedirían la formación y la preservación de los carbonatos. Estas aguas se enriquecerían en nutrientes, elementos en disolución, tales como Ca^{++} y Mg^{++}, y gases disueltos, fundamentalmente SH_2. Por el contrario, las aguas superficiales se mantendrían oxigenadas permitiendo la productividad primaria de carbonatos. Un descenso de la superficie de estratificación favorece la transferencia a las aguas superiores de los elementos químicos en disolución, dando lugar al desarrollo sobre extensas áreas de los depósitos carbonatos someros.

El estudio de series aflorantes en los continentes y los sondeos profundos en los océanos Atlántico e Indico demuestran que períodos anóxicos han podido desarrollarse a gran escala en los océanos mundiales durante épocas pasadas. Estos períodos parecen ocurrir a un ritmo determinado, localizándose durante el Jurásico inferior, Jurásico superior, Cretácico medio, Cretácico superior, Eoceno y Mioceno. Los períodos más favorables habrían sido precisamente el Jurásico superior y el Cretácico medio, lo cual parece ser una de las razones para la concentración de petróleo en el Golfo Pérsico. Depósitos similares a los sapropeles del Mediterráneo han podido ser una de las mayores fuentes para la formación y acumulación de petróleo en series antiguas. El conocimiento exacto de las causas que controlan su formación y el establecimiento de los tiempos geológicos pasados en los que se han formado tiene una clara proyección para la evaluación del potencial petrolífero de los márgenes continentales y cuencas oceánicas.



COMO CONSECUENCIA de los cambios climático-eustáticos, los índices de sedimentación han variado notablemente en el Mediterráneo durante las últimas decenas de miles de años. En zonas de fuerte aporte de sedimentos (Cono del Nilo, *en rojo*), la sedimentación marina profunda acusa las indicadas fluctuaciones de una manera más marcada que en zonas de poco aporte de sedimentos (Margen Balear, *en azul*); en la primera el promedio es de 16 cm/10³ años y en el Margen Balear lo es de 8 cm/10³ años. La preservación de la materia orgánica en sedimentos profundos está regida por estas variaciones en las tasas de sedimentación.

El análisis de la sedimentación profunda en el Mediterráneo aporta una luz considerable acerca de la evolución oceanográfica de este mar durante el Cuaternario. Los cambios oceanográficos han estado influidos en gran medida por la evolución climática, que a su vez controla las variaciones eustáticas. Las diferentes cuencas fueron afectadas por cambios sincrónicos similares, aunque de diferente magnitud, que han regido el depósito de sedimentos específicos, tales como sapropeles y lodos calcáreos Pero en el aspecto que este mar revela ser de particular importancia es en constituir un modelo para la interpretación de algunos depósitos de gran interés económico y del registro fósil.

En este sentido la situación presente de los océanos, con masas de agua bien oxigenadas, con relativa frecuencia no ha ocurrido en las épocas geológicas pasadas. Por el contrario, se han desarrollado, a escala incluso global, océanos estratificados, que han favorecido el extenso depósito de pizarras negras y sapropeles. Habrá que replantearse algunas de las interpretaciones geológicas clásicas basadas en el principio del uniformitarismo de Hutton, según el cual el presente es la clave del pasado.

Ciencia y sociedad

La "Larga marcha"

China ha emprendido una nueva "larga marcha" para emparejarse, en lo científico y lo tecnológico, con los países más desarrollados. Los objetivos y los medios propuestos para lograrlo se exponen en un borrador conocido por "Plan Nacional General para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, 1978-1985", que fue anunciado y aprobado por los dirigentes políticos del país en la Conferencia Nacional sobre la Ciencia, sin precedentes, celebrada durante la última primavera en Pekín. La conferencia señaló los puntos principales de la política china y definió la superioridad de la ciencia y la tecnología modernas como el punto básico de las "cuatro modernizaciones" (en agricultura, industria, defensa y ciencia y tecnología). Sus principales ponentes ensalzaron el papel clave que desempeñan los científicos y demás intelectuales, pidieron una política de "permitir un centenar de opciones de pensamiento", aprobaron los intercambios científicos y académicos internacionales y la utilidad de aprender de otros países, dando a entender que la investigación y la innovación tecnológica deben guiarse más por consideraciones científicas y algo menos por dogmas ideológicos. Afirmaron que el "grupo de los cuatro", conocido por su infructuoso intento de hacerse con el poder a la muerte de Mao Tse-tung, "tenía un intenso odio a la ciencia" y "perseguía y atormentaba a los intelectuales", retrasando de esta forma la ciencia china y la modernización del país.

El nuevo programa para los próximos ocho años fue expuesto ante los 6000 delegados de la conferencia sobre la ciencia por el Viceprimer ministro Fang Yi, ministro responsable de la Comisión Científica y Tecnológica, de ámbito estatal. "Nuestra revolución necesita ciencia", dijo. "Mediante ésta se incrementa la producción, y el pueblo también la necesita. Si anhelamos el socialismo, deberemos anhelar la ciencia y la tecnología. Nadie que esté en contra de la ciencia puede ser un revolucionario." Fang añadió que China lleva hoy entre 15 y 20 años de retraso, en muchas áreas, con relación a los países más desarrollados, "y todavía más en algunas otras". Para 1985, el país deberá haber reducido esta diferencia a unos diez años, dijo, y podía alcanzar o sobrepasar los niveles del mundo desarrollado en el año 2000. El plan contiene 108 "proyectos clave", distribuidos en 27 áreas. Fang dio la máxima prioridad a los ocho grandes apartados siguientes.

1. Agricultura. Antes de 3 o 5 años tiene que estar concluido un estudio de todos los recursos. La agricultura científica supondrá un gran incremento en la producción. Será necesario adaptar a la mecanización las técnicas tradicionales de la agricultura intensiva. Las tierras de bajo rendimiento, que suman un tercio de la extensión del país, podrán fertilizarse mejorando los suelos alcalinos, lateríticos y arcillosos, impidiendo la erosión y combatiendo las tempestades de arena y las sequías. Habrá planes de desarrollo para desviar agua desde el sur hacia el norte. Los otros objetivos que abarca son la fijación biológica del nitrógeno, la mejora de la calidad de las semillas y de las variedades de cultivo, la eficacia y la inocuidad ambiental de los insecticidas empleados y la investigación básica en biología agrícola.

2. Energía. Se incrementarán las prospecciones petrolíferas y de gas; deberán desarrollarse unos diez campos petrolíferos nuevos. Será necesario mecanizar las principales minas de carbón, estudiar la gasificación y licuación del carbón, potenciar la investigación en torno a la energía hidroeléctrica, previendo "enormes presas y gigantescas centrales generadoras de energía". Deberán construirse plantas que empleen la energía atómica y encauzarse las investigaciones hacia el aprovechamiento de la energía solar, geotérmica y eólica, y hacia los procesos de obtención de energía de las mareas y de la fusión controlada. "En todo trabajo y lugar, la gente tendrá que... reducir el consumo de energía."

3. Materias primas. El acero constituye el "eslabón fundamental en la industria". Se necesitarán métodos para aprovechar mejor la mena de hematites. China deberá llegar a ser "uno de los mayores productores del mundo de titanio y de vanadio". Se habrán de idear nuevos materiales de construcción de poco peso que incorporen desechos industriales. Deberán desarrollarse nuevos materiales sintéticos basados en el petróleo, gas natural y carbón. Se necesitarán "materiales complicados" para la defensa nacional.

4. Computadores. Dentro de tres años, deberá estar en marcha la producción industrial de circuitos integrados de gran escala, que le permitirá a China dar "un paso decisivo en la tecnología de los circuitos integrados de ultragran escala". Deberá estar en funcionamiento una línea de montaje de computadores; en 1985 tendrá que haber "una industria de computadores modernos de tamaño mediano". Se "popularizarán" los microcomputadores. Una parte de la producción industrial se controlará mediante computadores.

5. Láseres. China construirá "líneas de comunicación óptica experimentales", estudiará la fusión nuclear inducida por láser y aplicará la tecnología del láser "en todas las secciones de la economía y de la defensa nacional".

6. Espacio. Se hará hincapié en las comunicaciones, en los satélites científicos y en la investigación sobre percepción de señales lejanas. China "participará activamente en las investigaciones sobre el lanzamiento de laboratorios y vehículos espaciales".

7. Física de las altas energías. "Esperamos construir... un acelerador de protones" con una capacidad de 30 a 50 GeV dentro de 5 años y otro mayor en 1988; para entonces deberá existir "una base experimental moderna de física de las altas energías". Esto constituye un "proyecto clave en la lista de centros de investigación del país".

8. Ingeniería genética. "Nuestro país tiene sólo unos fundamentos bastante pequeños en este campo." Después de tres años de estudios básicos y de construcción de laboratorios, deberán combinarse las nuevas técnicas con los estudios en biología molecular, genética molecular y biología celular. Se impondrá la aplicación de la ingeniería genética (técnicas del ADN recombinante) al "tratamiento de ciertas enfermedades misteriosas y difíciles, y producir nuevas variedades de cultivos de alto rendimiento, capaces de fijar nitrógeno".

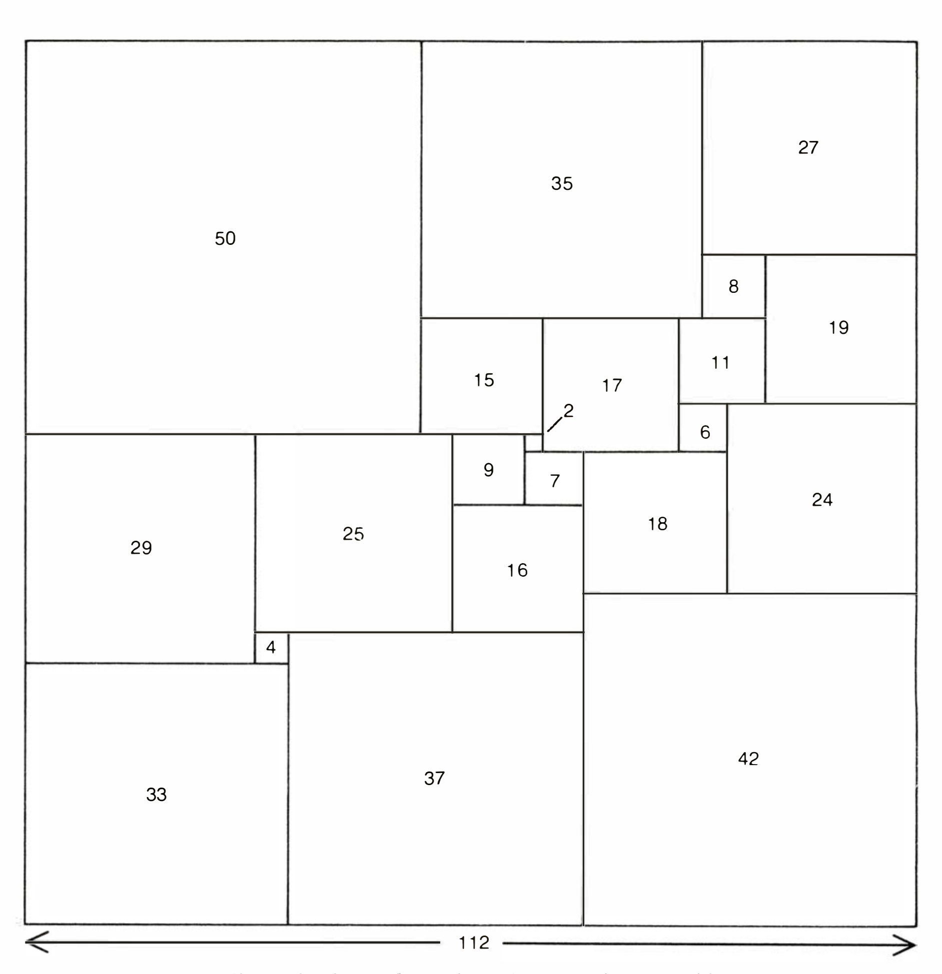
Fang pasó luego a describir los ambiciosos objetivos en la organización y administración de la educación y de la investigación. "Hay una necesidad apremiante de quitar de los cuerpos dirigentes a esas personas que son políticamente malas y que organizan 'terremotos' políticos, personas que pertenecen a la 'escuela de veletas' y a la 'escuela de informales'." Advirtió que "no es una política tan radicalmente proletaria como para no hacer caso de las prioridades y prohibir al pueblo alcanzar un nivel social elevado". Es necesario dar tiempo a los trabajadores destacados para estudios avanzados en su patria y en el extranjero. "Deben restablecerse los títulos técnicos y se tiene que implantar el sistema de la responsabilidad individual." La gente que aporte algo de importancia a la ciencia ha de ser recompensada. "La principal forma de recompensa debe ser el estímulo moral, pero también tienen que existir otras propiamente materiales... Deben alentarse y promoverse los libres enfrentamientos entre diferentes escuelas. La imposición por mandato gubernativo de una escuela determinada y la prohibición de las

demás sólo puede impedir el desarrollo de la ciencia. La verdad se alcanza a través de la discusión."

El cuadrado pluscuamperfecto

Un cuadrado perfecto, o cuadriculado, es aquel que está formado en su totalidad por cuadrados más pequeños, de manera que no haya dos del mismo tamaño. Un grupo de cuatro matemáticos de la Universidad de Cambridge descubrieron, en 1938, el primer cuadrado perfecto. Dicho cuadrado estaba dividido en 69 cuadrados menores, y por eso se dijo que era un cuadrado perfecto de orden 69. Desde entonces se han descubierto otros muchos, pero ahora, 40 años después del descubrimiento del primero, se ha encontrado el que quizá sea el cuadrado perfecto de mayor interés. A. J. W. Duijvestijn del Politécnico de Twente, en Holanda, ha encontrado el cuadrado perfecto de orden más bajo posible.

Duijvestijn empleó un programa de ordenador muy complejo para obtener un cuadrado perfecto de orden 21: un cuadrado de 112 unidades por lado, dividido en 21 cuadrados menores. Ya desde hace algún tiempo se sabe que no existen cuadrados perfectos de orden inferior o igual a 20, pero hasta ahora no se había encontrado ninguno de orden inferior a 24. El descubrimiento de este nuevo cuadrado perfecto indica que el orden más bajo es 21. Duijvestijn también ha podido demostrar que su cuadrado es el único de orden 21. Su cuadrado es el perfecto de orden mínimo, es decir, no es posible hallar otro que sea de orden menor ni del mismo orden, pero con algunos cuadrados diferentes.



El cuadrado perfecto de orden más bajo posible

Patatas de laboratorio

La patata se diferencia de otros cultivos extensos en que la porción comestible de la planta es un tubérculo, parte gruesa y carnosa de un tallo subterráneo. Cada tubérculo tiene brotes en espiral ("ojos") que pueden formar nuevas plantas idénticas a la que originó el tubérculo. Esta forma de reproducción vegetativa o asexual se explota comercialmente para conseguir una producción masiva del producto idéntico de una planta superior.

James Shepard y Roger Totten, de la Universidad del estado de Kansas, acaban de desarrollar un nuevo método de reproducción de la patata: inducen el crecimiento, el desarrollo de células aisladas "desnudas" de las hojas en un cultivo de tejidos, al objeto de que originen plantas completas. Las células desnudas o protoplastos son liberadas del tejido de la hoja por medio de enzimas que digieren la materia que compone la pared celular que mantiene unidas las células. Cuando los protoplastos se sitúan en el medio apropiado, empiezan a formar nuevas paredes celulares, y se dividen, formando un pequeño callo de tejido no diferenciado. Emerge luego un retoño del callo, que con el tiempo se convertirá en una planta madura. Ya se han generado, con este método, varios miles de plantas de patata. Aunque se había conseguido producir plantas de tabaco y de zanahoria a partir de células somáticas individuales (no germinativas), esta es la primera vez que se aplica la técnica de clonificación ("cloning") a una planta de cultivo extenso.

Shepard y Totten han hecho la mayoría de sus experimentos en la patata de "Idaho" (*Solanum tuberosum* L. cv. Russet Burbank), que es la variedad más preciada de Norteamérica por su gran tamaño, interior pulposo, gran valor proteínico y piel rojiza. Entre las plantas desarrolladas por Luther Burbank hace casi un siglo, está la variedad preferida por las familias para asar y por los fabricantes para preparar patatas fritas. Ello explica que la variedad Russet Burbank ocupe más extensión de cultivo en los Estados Unidos que cualquier otro tipo de patata. La variedad es un tetraploide, es decir, dotada de cuatro juegos de cromosomas. Por esta razón ha sido casi imposible mejorar la Russet Burbank con técnicas tradicionales de cultivo, sin perder alguna de sus características deseables. Es más, esta variedad es tremendamente sensible a varias enfermedades vegetales de importancia, entre las que se cuentan la roya temprana (que diezmó la cosecha de patata en Irlanda en las postrimerías de la década de 1840), la roya tardía, y otros trastornos producidos por hongos, bacterias, virus y nemátodos.

Ulrich Matern y Gary A. Strobel, de la Universidad del estado de Montana, en colaboración con Shepard, han aislado dos toxinas a partir del hongo de la roya temprana (*Alternaria solani*) que, juntas, reúnen todos los síntomas de la enfermedad. Cuando aplicaron las toxinas a las hojas de unos 500 clones derivados de protoplastos de una planta Russet Burbank, notaron gran variación en la resistencia total. El carácter de resistencia a la roya temprana podrían transmitirse de generación en generación por reproducción vegetativa, indicando que dicho carácter, una vez obtenido, no se perdía durante la reproducción asexual. Strobel y Shepard creen que, si se generan clones mutantes de la Russet Burbank, sería posible mejorar la planta, "no sólo en cuanto a resistencia a la enfermedad se refiere, sino también lo referente al número de tubérculos, el tamaño y la forma de la planta y la calidad del tubérculo".

Máseres cósmicos

Algunas regiones nebulosas y ciertas atmósferas estelares emiten radiación intensa en forma de microondas. Dicha radiación intensa se genera por efecto máser, que corresponde, en la banda de las microondas, al efecto láser para la luz

Dale F. Dickinson

El desarrollo del máser como dispositivo de una exactitud sin precedentes para medir el tiempo y como un medio para amplificar señales débiles en microondas fue, hace 24 años, una realización técnica de primera magnitud. Concebido por Charles H. Townes, el máser sacó gran partido del profundo conocimiento del comportamiento mecánico-cuántico de la materia adquirido durante el medio siglo anterior. Sería interesante imaginar cómo hubieran interpretado los radioastrónomos una señal peculiar que detectaron en 1965, procedente de una nube de moléculas de hidroxilo (OH) dentro de la Gran Nebulosa de Orión, si el máser no hubiera estado ya inventado. Pero la pregunta es un bizantinismo académico, puesto que, por entonces, los máseres se instalaban ya como amplificadores en radiotelescopios. Ahora bien, la señal era de una intensidad completamente inesperada, hasta el extremo de que los radioastrónomos, en chanza y mientras no se resolvió el rompecabezas, se referían al desconocido gas emisor como al "misterio". Por fin, se llegó al convencimiento de que las nubes de gas situadas en las proximidades de nebulosas que contuvieran estrellas jóvenes brillantes podrían funcionar como gigantescos máseres cósmicos. Algunos años más tarde se descubrieron también máseres en las polvorientas atmósferas de estrellas rojas envejecidas.

Un máser opera elevando un gran número de átomos o de moléculas de un gas a un estado de energía (o cuántico) particular e incitándolo luego a decaer simultáneamente hacia otro estado de energía inferior. La energía, y por tanto la frecuencia, de cada fotón emitido en el proceso corresponde exactamente a la energía desprendida por un átomo o molécula al caer del estado superior al inferior. La palabra inglesa máser se ha construido a partir de los distintos términos que resumen el proceso: amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación ("microwave amplification by stimulated emission of radiation"). Si la radiación emitida está en la región óptica del espectro, se sustituye "luz" por "microonda"; de ahí la palabra láser.

Durante los últimos doce años, se ha avanzado mucho en el conocimiento de los máseres interestelares y estelares. Se han descubierto, hasta ahora, unas 300 fuentes con máseres de hidroxilo. Se han encontrado además máseres de agua asociados con más de 80 estrellas. Un 80 por ciento de las estrellas con máseres de agua en las que se ha buscado emisión hidroxilo han resultado tener también máseres de hidroxilo, que apenas si sorprende, pues son muy parecidas químicamente las moléculas H_2O y OH. Más recientemente, se han identificado máseres de monóxido de silicio (SiO) en las envolturas de estrellas variables, muchas de las cuales albergan también máseres de agua y máseres de hidroxilo.

Para que un máser funcione, debe haber una fuente de energía que "bombee" las moléculas a un nivel cuasiestable, a partir del cual se vean inducidas a caer en un nivel más bajo. En un principio se propusieron varios procesos de bombeo: colisiones moleculares, ondas de choque y reacciones químicas, entre otros. Hoy parece seguro que, en los máseres detectados en las envolturas de estrellas variables y tal vez en otros sistemas máser cósmicos, el agente de bombeo es la radiación infrarroja.

El primer máser de hidroxilo

En 1963, dos años antes del descubrimiento de la desconcertante señal procedente de la nebulosa de Orión, el hidroxilo había sido ya la primera molécula detectada en el espacio interestelar. Las moléculas de hidroxilo de una nube de gas frío se pusieron de manifiesto al absorber parte de la energía en radiofrecuencias emitida por Casiopea A, residuo de una explosión de supernova. Produjeron una hendidura reveladora, o raya de absorción, en el espectro de radio a una frecuencia de 1667 megahertz, que corresponde a una longitud de onda de 18 centímetros. El descubrimiento estimuló una amplia búsqueda de rayas de absorción del hidroxilo en otras regiones del espacio, que se sabía estaban iluminadas por detrás mediante radiofuentes intensas. Asimismo, parecía posible el descubrimiento de moléculas de hidroxilo que emitieran débilmente a 1667 megahertz, si éstas se presentaran con una densidad suficiente, tal vez en nubes de las que se sabía eran ricas en hidrógeno atómico (H). Sin embargo, no se detectó ninguna emisión característica de la molécula de hidroxilo procedente de aquellos lugares que, en un principio, se supuso habían de ser los más prometedores.

El descubrimiento inicial de rayas de emisión a partir de moléculas de hidroxilo del espacio fue hecho por radioastrónomos de la Universidad de California en Berkeley. Estos habían esperado, en realidad, encontrar rayas de absorción de hidroxilo al observar la nebulosa de Orión, una gran región de hidrógeno ionizado que está a unos 1500 años luz de nosotros. La causa de su perplejidad inicial fue que la raya de emisión observada no sólo era mucho más intensa de lo que todos hubieran sospechado, sino que, además, poseía la frecuencia, inesperada, de 1665 megahertz. Aunque se trata de una de las cuatro rayas de emisión que caracterizan el estado fundamental de la molécula de hidroxilo, es decir, el estado de más baja energía, normalmente alcanza sólo la mitad de la intensidad de la raya de 1667 megahertz. En el espectro de radio de la nebulosa de Orión, la raya de 1667 megahertz se hallaba extrañamente ausente. Las otras dos rayas del estado fundamental de la molécula de hidroxilo caen a 1612 y 1720 megahertz; puesto que ambas suelen poseer, en el laboratorio, la novena parte de la intensidad de la raya de 1667 megahertz, no se esperaba que fueran detectables. Apoyados en que las moléculas hidroxilo no podían generar una raya mucho más intensa a 1667 megahertz, los investigadores de Berkeley recurrieron a su hipótesis del "misterio".

Tras nuevos estudios de la raya de emisión de la nebulosa de Orión, y tras la ob-

servación de rayas similares en espectros de otras nebulosas, los astrónomos de Berkeley se vieron obligados a concluir osadamente que habían encontrado el primer máser natural. Cualquier duda que pudiera quedar se disipó cuando los astrónomos pudieron calcular la temperatura aparente de las regiones "máser", es decir, la temperatura a la cual habría que llevar a un conjunto de moléculas de hidroxilo en equilibrio térmico para que emitieran la cantidad de energía observada en las rayas de emisión. Algunas estimaciones de la temperatura llegaron incluso a los 10^{13} grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). Puesto que las moléculas se destruirían a temperaturas muchísimo más bajas, la cifra calculada indicaba claramente que las reglas usuales de la termodinámica no eran aplicables: las rayas de emisión de la nebulosa de Orión tenían que ser el resultado de un proceso de no equilibrio. La única explicación razonable era un máser.

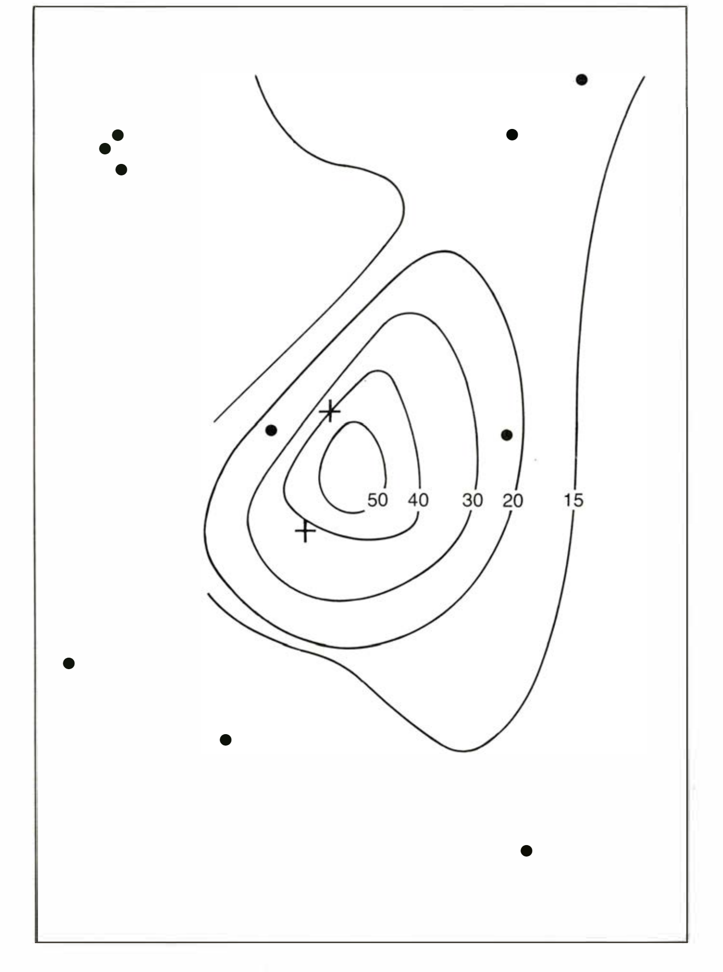
Detengámonos brevemente en los fenómenos cuánticos que están en la base del máser, sea éste cósmico o artificial. Los átomos y las moléculas poseen energía, que se manifiesta de varias maneras. En la representación tradicional del átomo, los electrones se mueven en torno al núcleo siguiendo órbitas sencillas. En el caso de las moléculas, resulta un tanto más preciso visualizar los electrones como formando nubes. Puesto que los "núcleos" de las moléculas constan de dos o más átomos, los movimientos de los propios átomos pueden contribuir a la energía total de la molécula. Los átomos pueden vibrar el uno con respecto al otro; pueden girar balanceando sus extremos, como minúsculos badajos, y pueden presentar también otras débiles interacciones electromagnéticas; todo ello contribuyendo a la energía de la molécula.

Mecánica cuántica de los máseres

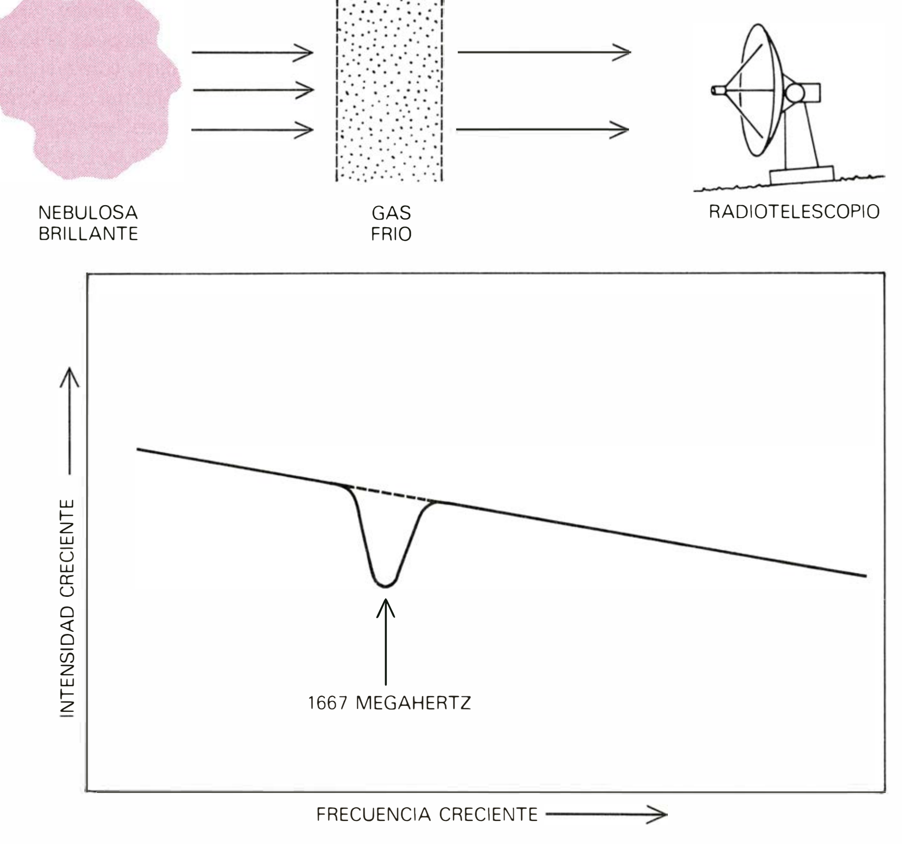
La cantidad de energía variará en función del estado de excitación momentáneo de la molécula, pero la mecánica cuántica nos enseña que la energía no puede variar de un modo continuo; se dispone sólo de niveles de energía discretos, como si fueran peldaños. Cuando un átomo o una molécula son excitados (ganan energía), por ejemplo en una colisión con otro átomo o molécula o, al encontrar un fotón de luz, deben dar un salto cuántico exacto hasta un nuevo peldaño de la escalera de energías. Recíprocamente, cuando el átomo o la molécula se desexcitan, caen a lo largo de uno o más peldaños enteros; la diferencia de energías se irradia entonces como un cuanto de energía electromagnética, o bien se transfiere directamente, a través de una colisión, a otro átomo o molécula.

Las transiciones más energéticas son las que implican a los niveles de energía de los electrones, las cuales suelen dar lugar a fotones de radiación ultravioleta o visible. Tales transiciones, que tienen lugar en estrellas y en nebulosas gaseosas calientes, son objeto de estudio por parte de los astrónomos ópticos. Las transiciones de menor energía hacen intervenir las rotaciones

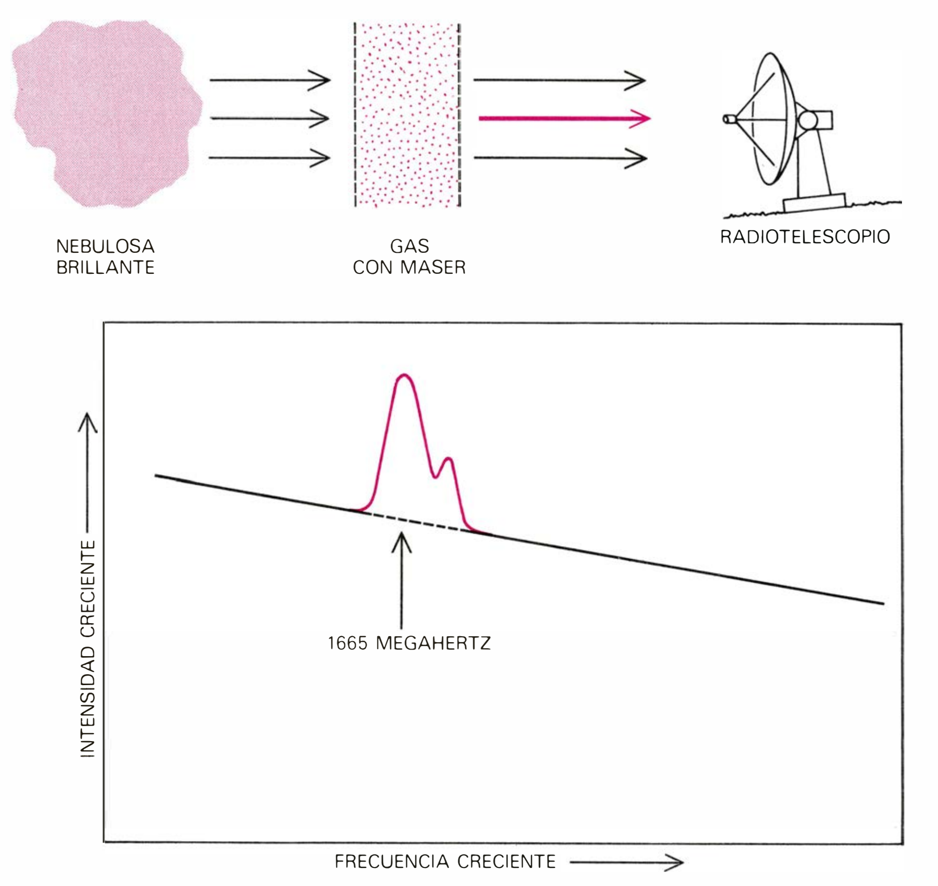




MASERES DE AGUA INTERESTELARES de Messier 17 (la Nebulosa de la Herradura o Nebulosa Omega) en la constelación de Sagitario. Son los que están marcados con dos cruces. Según parece, la región constituye un lugar de activa formación de estrellas. Las curvas de nivel muestran la intensidad relativa de la radiación de microondas, procedente de moléculas de monóxido de carbono. Un objeto infrarrojo, no visible en la fotografía, cae cerca del centro de la curva más interior. El objeto puede representar una estrella en proceso de formación. Estos máseres, descubiertos en 1973 por K. J. Johnston, R. M. Sloanaker y J. M. Bologna, del Laboratorio Naval de Investigación, radian intensamente a una frecuencia de 22.235 megahertz (una longitud de onda de 1,35 centímetros). Se han encontrado ya varias docenas de máseres de agua interestelares. Asimismo, se han localizado más de 80 máseres de agua en las atmósferas de estrellas gigantes y supergigantes rojas variables. Suelen darse máseres de hidroxilo (OH) presentes en las cercanías de los máseres de agua (H_2O).



RAYAS DE ABSORCION, que se forman cuando una nube de gas frío absorbe algo de la radiación de una nebulosa brillante o de una fuente parecida. La radiación se absorbe a una frecuencia que es característica de las moléculas del gas, en este caso moléculas de hidroxilo, con una raya de absorción a 1667 megahertz. La anchura del perfil de absorción sirve para medir la dispersión de velocidades de las moléculas del gas.



RAYA INTENSA DE EMISION que se observa cuando una nube de gas contiene un sistema máser. En este caso, la radiación procedente de la nebulosa excita un máser de hidroxilo y le hace emitir un haz de radiación a una frecuencia de 1665 megahertz, en vez de a la frecuencia más intensa de 1667 megahertz.

de las moléculas, cuyos cuantos suelen caer en la región del espectro de las frecuencias de radio. Tales emisiones de baja energía, que entran en el campo de competencia de los radioastrónomos, emanan de las regiones cósmicas más frías, como las nubes interestelares, o bien, en el caso de algunos máseres, de las extensas atmósferas de ciertos tipos de estrellas frías.

Los máseres amplifican de modo selectivo ciertas transiciones, alterando la distribución de equilibrio de los átomos o de las moléculas en un nivel de energía particular. De ordinario, a una temperatura dada, las moléculas de una determinada muestra de gas están en equilibrio térmico y presentan una distribución suave de energías, con un valor máximo que caracteriza la temperatura. Si ésta disminuye, el movimiento cinético medio de las partículas de la muestra decrece, el estado medio de excitación baja y el pico de la emisión salta a una energía más baja. Si la temperatura aumenta, el estado medio de excitación sube y el pico se corre a un valor más alto. En equilibrio térmico, la distribución global de los niveles de energía atómicos o moleculares está determinado por la temperatura cinética de la muestra.

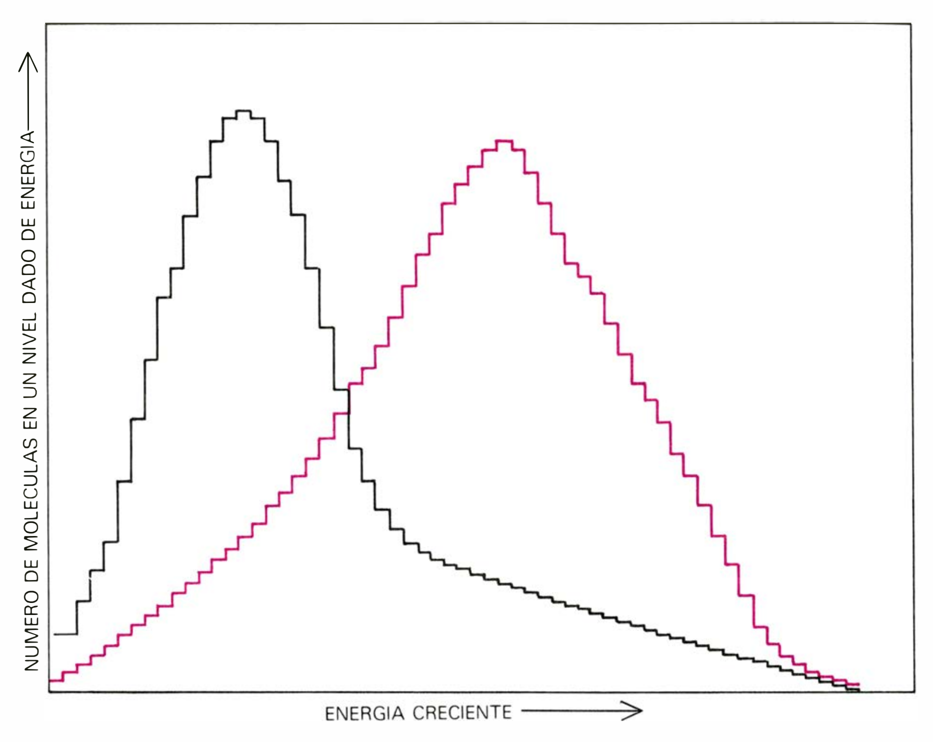
Puede haber emisión máser si la situación de equilibrio se deshace, de suerte que un nivel de energía particular quede superpoblado, con lo que llegará a contener muchas más moléculas de lo que cabría esperar a partir de la temperatura cinética del gas. La creación de un estado superpoblado se denota como una inversión de dicho nivel de energía. Esas inversiones pueden ocurrir en nubes interestelares de baja densidad, que encierran, típicamente, entre 10^3 y 10^7 moléculas por centímetro cúbico (en comparación con las 10^{19}, aproximadamente, del aire que respiramos). Por ser poco frecuentes las colisiones entre moléculas, no siempre dominan la excitación del gas, como sí acontece en un gas en equilibrio térmico. Pueden surgir desviaciones con respecto al equilibrio, que "inviertan" o distorsionen las poblaciones de ciertos niveles de energía.

Pueden crearse tales inversiones de población de dos maneras: por colisiones o por irradiación. En ambos casos puede hacerse que el gas absorba energía de un modo altamente selectivo. Para ser muy eficaz, la propia energía de entrada debe caer dentro de unos límites estrechos y consistir, en los casos ideales, en fotones que sean predominantemente de una sola frecuencia, o bien, para un proceso de colisión, en un haz de electrones, casi todos de la misma energía.

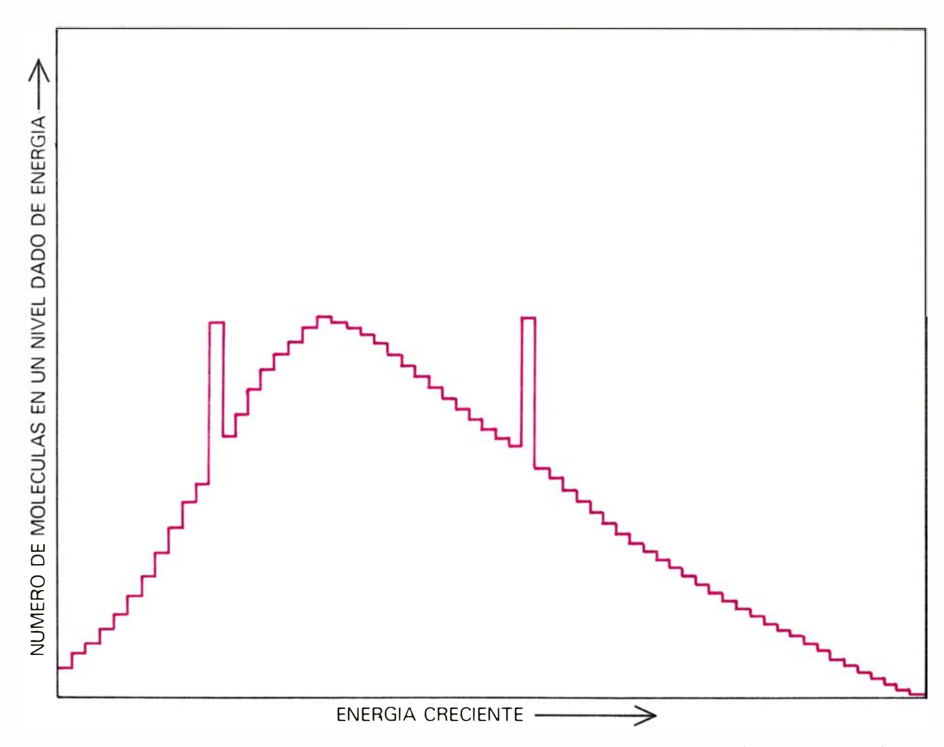
Se cree hoy que la mayor parte de los máseres cósmicos están bombeados por procesos radiativos. Un ejemplo típico de tal proceso de bombeo se da en el máser

"de tres niveles". Una molécula en el nivel 3, el más alto, presenta gran probabilidad de perder espontáneamente energía y decaer, a menudo descendiendo en cascada a través de múltiples niveles intermedios, hasta el nivel 2. Sin embargo, cuando la molécula alcanza el nivel 2, tiene sólo una probabilidad relativamente pequeña de caer espontáneamente al nivel 1. El gas puede bombearse hacia el nivel 3 si se le suministra radiación que corresponda, en frecuencia, a la transición del nivel 1 al nivel 3. Muchas moléculas absorberán la energía, saltarán al nivel 3 y radiarán en seguida algo de la energía que acaban de adquirir, cayendo en cascada hacia el nivel 2. De este modo el nivel 2 queda invertido, o superpoblado, esto es, a punto para la acción máser.

Una molécula que se halle en el nivel 2 tiene afinidad para los cuantos cuya energía sea igual a la diferencia de energías entre los niveles 1 y 2. Como la roca que se balancea al borde de un acantilado, la molécula necesita sólo un pequeño empujón para precipitarse al nivel 1 y radiar un cuanto de energía igual al que ha desencadenado su emisión. Si esto sucede, los dos cuantos que viajan ahora a través de la nube pueden inducir a radiar a dos moléculas más que estén en el nivel 2. Los dos cuantos se convierten en cuatro, los cuatro en ocho, y así sucesivamente; el cuanto inicial se amplifica millones de veces, mientras la onda de radiación se propaga a través de la nube de gas, alimentándose de la reserva disponible de moléculas en el nivel 2. Así, el proceso máser concentra gran parte de la energía de la nube en un haz que es a la vez intenso, unidireccional y de una sola frecuencia.



EQUILIBRIO TERMICO de una hipotética población de moléculas de gas, representado por una distribución suave de estados de energía en torno a un cierto valor medio. A bajas temperaturas, la mayor parte de las moléculas están concentradas en los niveles de energía bajos *(curva en negro).* **Al subir la temperatura, la distribución se desplaza hacia niveles más altos** *(color).* **Se dice que esas poblaciones radian térmicamente.**

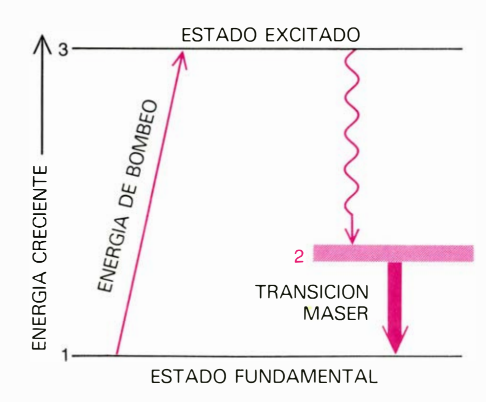


DESEQUILIBRIO TERMICO, que se introduce cuando ciertos estados de energía (aquí dos estados) han adquirido una población inusitadamente grande de moléculas a expensas de los demás. Tales estados "invertidos" constituyen una fuente de radiación no térmica en los máseres, tanto artificiales como naturales.

Estrellas con máseres moleculares

Debido a que los máseres cósmicos son un fenómeno descubierto sólo recientemente, queda todavía mucho por aprender acerca de ellos. Por ahora, los máseres que mejor se entienden son los asociados con una clase especial de estrellas viejas, moribundas, que se conocen por variables rojas. El primer máser estelar se detectó en 1968, cuando Willian J. Wilson y Alan H. Barrett, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, observaron una intensa emisión característica del hidroxilo, procedente de varias estrellas rojas variables. Se trata de estrellas que han consumido la mayor parte de su combustible hidrógeno y han dejado la "secuencia principal" de estrellas estables. Con el agotamiento de su hidrógeno, las estrellas empiezan a perder la presión interna requerida para equilibrar la atracción gravitatoria de su propia masa. Ondas de choque periódicas eyectan materia hacia el medio interestelar circundante, mientras que las propias estrellas se vuelven, alternativamente, más brillantes y más débiles.

Esas estrellas se dividen aproximadamente en dos clases. Las variables Mira Ceti (así llamadas en razón del prototipo de la clase, cuya variabilidad fue descrita por vez primera en 1597) son estrellas "gigantes", variables, de largo período cuyos ciclos son del todo predecibles, típicamente de 200 a 500 días. La segunda clase consta de "supergigantes", mayores y más luminosas, con períodos menos regulares, que van de los 500 a los 1000 días.



EL MASER "A TRES NIVELES" ilustra el fundamento de los máseres. Una molécula en el estado fundamental (*1*) absorbe energía por colisión o radiación y es "bombeada" entonces a un nivel de energía mucho más alto (*3*). La molécula pierde espontáneamente algo de su nueva energía y desciende en cascada a través de varios niveles intermedios, hasta llegar a un estado cuasiestable (*2*). Con ello se invierte el nivel de energía 2. Si la molécula es golpeada ahora por un fotón cuya energía coincida exactamente con la diferencia de energías que hay entre los niveles 2 y 1, dicha molécula caerá al nivel 1, liberando por sí misma un fotón idéntico en ese proceso. De este modo, de un fotón se hacen dos, de dos cuatro, y así sucesivamente, para dar un número exponencialmente creciente de fotones monoenergéticos.

Novas y supernovas aparte, las variables rojas son las estrellas que llevan una vida más rica en cataclismos. Cada pulsación arroja gas y polvo a una vasta atmósfera circumestelar, atmósfera cuyas dimensiones son comparables a las del sistema solar. (El radio de la estrella-madre puede también exceder holgadamente la distancia del Sol a la Tierra.) En esa nube circumestelar se origina la emisión máser.

El color constituye una propiedad clave de esas estrellas variables con emisión máser. El Sol, cuya temperatura superficial es de unos 6000 grados Kelvin, radia con el máximo de intensidad a aproximadamente 0,5 micras, en la región amarillo-verdosa del espectro visible. Las estrellas rojas variables de largo período son mucho más frías, alrededor de los 2000 grados Kelvin, y la mayor parte de su radiación está corrida hacia la región infrarroja, invisible, del espectro, con un máximo de intensidad cerca de 1,5 micras. Técnicas infrarrojas recientemente desarrolladas han permitido a los astrónomos explorar esta región espectral, que antes había resultado inaccesible. Un descubrimiento importante es que todas las gigantes y supergigantes rojas variables están caracterizadas por un fuerte "exceso infrarrojo", es decir, emiten más radiación infrarroja de la que sería de esperar a partir de sus espectros visibles. Con una temperatura típica de varios centenares de grados Kelvin, levemente por encima del punto de ebullición del agua, la capa de gas y polvo radia intensamente en las longitudes de onda de la región de entre las 10 y las 20 micras.

Como hemos visto, la molécula de hidroxilo, en su estado fundamental, emite normalmente la radiación de mayor intensidad a 1667 megahertz, cerca de la mitad menos intensa a 1665 megahertz y muy débilmente a 1612 y 1720 megahertz. En la gran mayoría de los máseres de hidroxilo estelares, la radiación más intensa es la de 1612 megahertz, que domina completamente sobre las rayas de 1667 y 1665 megahertz; éstas, frecuentemente, se hallan ausentes. La raya a 1720 megahertz no se ve nunca.

La segunda especie molecular descubierta en un máser asociado con una estrella fue el agua, que se vio emitía a 22.235 megahertz, correspondientes a una longitud de onda de 1,35 centímetros. En 1969 se observó un máser de agua intenso en la estrella designada por *VY* en la constelación del Can Mayor, en el cielo austral. Se han descubierto desde entonces más de 80 estrellas con máseres de agua.

El tercer tipo de máser molecular observado en estrellas variables presenta rayas de emisión de monóxido de silicio (SiO), principalmente a 43.122 megahertz (6,95 milímetros) y 86.243 megahertz (3,47 milímetros). El descubrimiento de emisión intensa a esas frecuencias fue sorprendente, toda vez que el monóxido de silicio es una de las moléculas menos abundantes de las que se han detectado hasta ahora en el espacio. Efectivamente, el descubrimiento fue resultado de la suerte y de la astuta labor detectivesca acometida por Lewis E. Snyder, de la Universidad de Illinois, y David Buhl, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Una de las rayas de monóxido de silicio apareció en la "ventana" de frecuencias de un instrumento cuando buscaban otra molécula en la nebulosa de Orión. Una rápida comprobación de la frecuencia puso de manifiesto que la señal estaba en el lado de las bajas frecuencias de la banda del instrumento, un intervalo de frecuencias al que era sensible el receptor, pero que estaba completamente fuera del intervalo de interés.

Un trazado cuidadoso de esa región celeste reveló que la fuente de la emisión era puntual, como cabía esperar de un máser. La raya de monóxido de silicio tenía múltiples rasgos que impedían una fácil estimación de la frecuencia de emisión. Sin embargo, una comparación difícil y detallada con el máser de agua de la nebulosa de Orión dio pistas que llegarían a conducir a una frecuencia coincidente con una transición rotacional conocida de la molécula de monóxido de silicio. Sorprendentemente, no se trataba de una transición del estado fundamental, sino una transición rotacional encontrada cuando la molécula está en un modo de vibración altamente excitado, el cual requiere temperaturas por encima de los 1000 grados Kelvin para tener una población molecular apreciable.

La combinación de una especie molecular poco abundante y un estado raro, altamente excitado, produjo un escepticismo generalizado. Cierto astrofísico aventuró que la fuente podía ser un máser, pero no de monóxido de silicio. Otro repuso que era monóxido de silicio, ¡pero que era imposible que fuera un máser! La reivindicación llegó cuando John H. Davis y Patrick Thaddeus, que trabajaban en el Millimeter-Wave Observatory, de la Universidad de Texas, detectaron dos rayas rotacionales adyacentes, de monóxido de silicio, a 43.122 y 129.363 megahertz, con lo que confirmaron, más allá de toda duda, que la identificación inicial de Snyder y Buhl era correcta.

Máseres con corrimiento Doppler

Durante varios años se han venido controlando las estrellas con máseres moleculares, apreciándose que una de sus características más notables es la variación de las emisiones visibles, infrarroja y máser de hidroxilo. La variación en la emisión visible de la estrella es periódica, sube y baja suavemente cada varios centenares de días. El seguimiento del flujo infrarrojo ha mostrado que sigue de cerca las variaciones de la emisión visible. Se ha venido registrando, asimismo, la intensidad de la emisión procedente de los máseres OH para un cierto número de estrellas; también varía en fase con la emisión visible. En lo que se refiere a la emisión a partir de los máseres de agua, queda peor definida. Sólo se han seguido con detalle unas cuantas estrellas. Dos de ellas presentan variaciones bien sincronizadas con las emisiones visibles. Otra estrella presenta una relación ambigua y, en una cuarta, las emisiones del agua y visible están, si acaso, anticoordinadas.

Las diversas rayas espectrales asociadas con las estrellas máser están normalmente corridas hacia arriba o hacia abajo en frecuencia, según la velocidad de la fuente emisora, con lo que proporcionan importante información sobre la estructura de la estrella y la de su atmósfera circundante. Si la nube máser se mueve hacia nosotros, la frecuencia está corrida hacia arriba; si se aleja, la frecuencia está corrida hacia abajo. Los astrónomos están siempre atentos a esos corrimientos Doppler de frecuencia. En este caso, la dispersión total de velocidades puede ser de sólo unos cuantos kilómetros por segundo, o llegar a las decenas de kilómetros por segundo.

Las rayas de emisión del hidroxilo caen casi siempre dentro de dos grupos de distinta velocidad. Se infiere claramente que

están implicados dos máseres, uno en la parte orientada hacia nosotros de la envoltura circumestelar que está siendo expulsada de la estrella y otro en la parte opuesta. Aunque los máseres están distribuidos esféricamente dentro de la atmósfera estelar, los haces máser son muy direccionales. Los máseres estelares producen un haz "hacia delante" y un haz "hacia atrás", formando entre ambos un ángulo de 180 grados. La orientación del eje del haz parece venir dictada por el flujo de radiación estimulante que procede de la estrella central. Así pues, sólo son observables los máseres que caen aproximadamente en la visual de la estrella; los situados en otros lugares de la envoltura estelar proyectan sus haces radialmente, en otras direcciones. Allí donde los máseres de agua y de monóxido de silicio coexistan con los de hidroxilo, las velocidades Doppler de los primeros caerán siempre entre los extremos de los grupos de emisión hidroxilo, y presentarán a veces una estructura con dos picos.

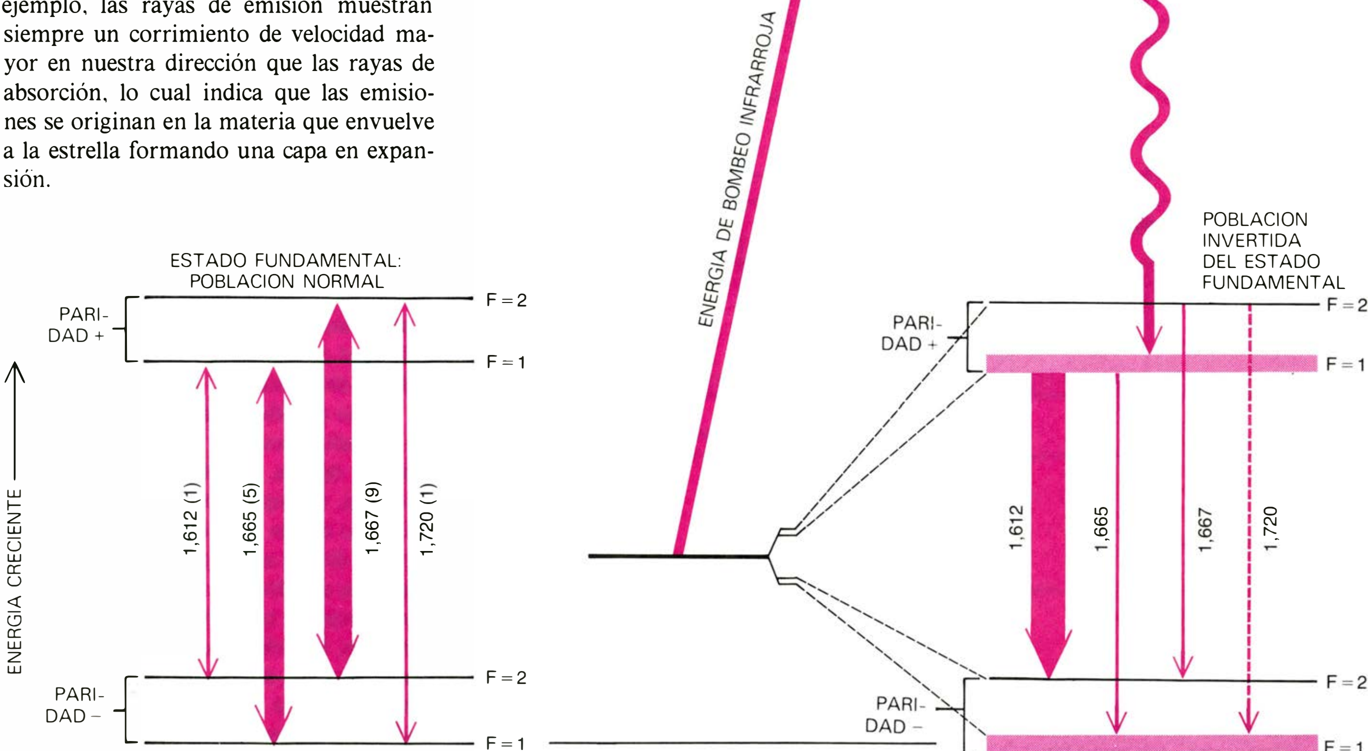
He dicho que las rayas máser de hidroxilo presentan normalmente dos picos de velocidad. Si se representa la magnitud de la separación de velocidades en función del período de pulsación de la estrella central, se observa que están correlacionados de manera sorprendentemente sencilla: cuanto más largo es el período, mayor es la separación de velocidades. Los máseres de hidroxilo asociados con las variables de período corto Mira Ceti tienen separaciones de velocidad del orden de cinco a 15 kilómetros por segundo; los máseres de hidroxilo asociados con las supergigantes de largo período tienen separaciones de velocidad de hasta 40 kilómetros por segundo. Esta notable regularidad entre dos cantidades aparentemente no relacionadas sugiere un grado de orden que debería contribuir, en su caso, al proceso de construcción de modelos. Veamos ahora qué hemos aprendido acerca de las estrellas máser e intentemos encajar las piezas dentro de una representación coherente.

Dividiremos los esfuerzos en dos partes. Primero, ¿cuál es la fuente de energía que bombea el máser? Segundo, dada una fuente, ¿podemos desarrollar un esquema del sistema estelar en cuyo seno quepa el máser?

Las colisiones y la radiación constituyen los dos mecanismos de bombeo más probables. La intensidad del máser de hidroxilo cambia siguiendo la de la luz de la estrella. El ciclo del máser se retrasa, con respecto al de la luz, a lo sumo 30 días. Esto implica que el máser es bombeado por radiación, por la sencilla razón de que las colisiones no podrían propagarse con rapidez suficiente a través de la nube interestelar para producir el cambio de intensidad en el tiempo observado. Por ejemplo, las velocidades asociadas con la estrella y su gas circumestelar son del orden de los 10 kilómetros por segundo o menos. Incluso si el radio de la atmósfera circumestelar fuera sólo de 10^9 kilómetros (algo mayor que la distancia del Sol a la órbita de Júpiter), el tiempo para que un proceso colisional se abriera paso a través de la at-

Bombeo del máser

Al reconstruir todo el conjunto de átomos y moléculas emisores de la estrella, deben tenerse también en cuenta las rayas de emisión y de absorción, más familiares, según quedan registradas con las técnicas ópticas usuales. Las rayas ópticas presentan ciertos rasgos característicos. Por ejemplo, las rayas de emisión muestran siempre un corrimiento de velocidad mayor en nuestra dirección que las rayas de absorción, lo cual indica que las emisiones se originan en la materia que envuelve a la estrella formando una capa en expansión.

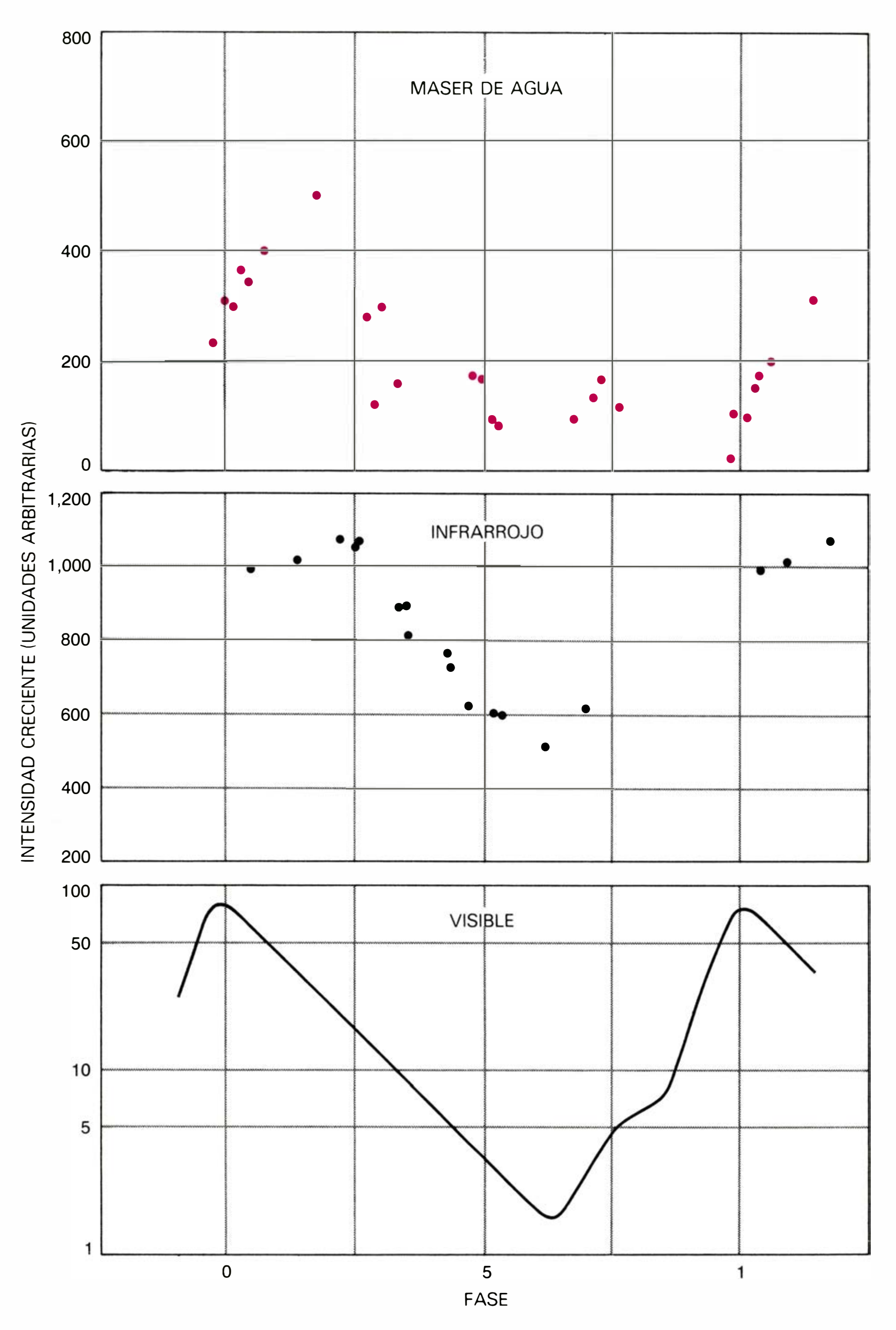


MASERES COSMICOS DE HIDROXILO, que son aquellos que hacen intervenir el estado fundamental de la molécula de hidroxilo, formado por cuatro niveles de energía muy juntos (un doblete lambda). Cuando los niveles de energía están poblados normalmente *(izquierda)*, la molécula radia en cuatro frecuencias: 1612, 1665, 1667 y 1720 megahertz. Las intensidades relativas de las rayas vienen dadas por los números entre paréntesis. En los máseres estelares de hidroxilo *(derecha)* una fuente de energía de bombeo, que en muchos casos se trata evidentemente de radiación infrarroja, invierte la población del estado fundamental de modo que la emisión más intensa es, típicamente, la de 1612 megahertz en vez de la de 1667 megahertz. La raya de 1720 megahertz está ausente.

mósfera sería de unos 10^8 segundos, es decir, tres años. Debemos concluir, pues, con seguridad que el máser es bombeado por radiación.

La pregunta siguiente es: ¿De qué tipo de radiación se trata? ¿Es radiación visible, ultravioleta, infrarroja o de microondas? Una pista importante puede dárnosla el carácter de la emisión de la molécula de hidroxilo. Para configurar una raya máser intensa de la transición a 1612 megahertz hay que invertir las poblaciones de los dos estados más bajos de cada mitad del doblete del estado fundamental. Tal inversión inhibiría, al propio tiempo, la emisión a 1720 megahertz. La inversión simétrica de ambos pares de estados daría un máser del género típicamente observado en las atmósferas de estrellas rojas variables: un máser con emisión intensa a 1612 megahertz y sin emisión a 1720 megahertz. Con ligeras modificaciones en la población del par superior de estados se podrían producir también rayas de emisión más débiles a 1667 y 1665 megahertz, que se observan también en algunas casos.

Un análisis de los posibles esquemas radiativos de bombeo ponen de manifiesto un rasgo que es exclusivo de la radiación infrarroja; la regla de selección de la paridad, de mecánica cuántica, en cuyos detalles no entraremos, nos dice que cuando el bombeo infrarrojo revuelve las poblaciones de los cuatro niveles del estado fundamental de la molécula de hidroxilo, la inversión de los pares de niveles superior e inferior debe ocurrir simétricamente, justo de la manera que se precisa para crear las rayas de emisión observadas. Las otras radiaciones de bombeo no están constreñidas de este modo, con lo cual resulta prácticamente seguro que el máser estelar está bombeado por radiación infrarroja. Aunque no se han estudiado tan exhaustivamente los mecanismos máser para el agua y para el monóxido de silicio como ha ocurrido con el mecanismo correspondiente al hidroxilo, esas moléculas también tienen transiciones infrarrojas a estados que podrían crear inversiones de población de la clase que se necesita para dar las rayas de emisión del agua y del monóxido de silicio observadas. Cuando se combinan esos análisis con el exceso infrarrojo observado en estrellas rojas variables, el argumento en favor del bombeo infrarrojo resulta muy convincente.



LAS VARIACIONES DE INTENSIDAD de los máseres de agua *(arriba)* en la atmósfera de la estrella gigante roja U Herculis en estricto paralelo con los cambios de la radiación infrarroja a 2,2 micras de longitud de onda *(medio)* y de la producción de luz visible *(abajo)*. La intensidad de la luz, representada aquí en escala logarítmica, varía por un factor de más de 40, es decir, un poco más de cuatro magnitudes, durante cada semiciclo. Los cambios en paralelo de la emisión infrarroja y de la emisión del máser de agua, que están representados a escala lineal, son mucho menores. El comportamiento síncrono de las tres clases de emisión de U Herculis y de estrellas similares constituye una prueba valiosa de que los máseres estelares están bombeados por radiación (probablemente infrarroja) en vez de por colisiones moleculares. Los espectros de microondas se han obtenido por Philip R. Schwartz, del Laboratorio Naval de Investigación, Paul M. Harvey, de la Universidad de Arizona, y Alan H. Barrett, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Velocidad de las estrellas máser

El marco físico del máser es la capa atmósferica que rodea la estrella variable. Para interpretar las velocidades de las rayas de emisión máser, tal y como las medimos desde la Tierra, debemos sustraer la velocidad de la estrella madre, en el mismo sistema de referencia. Este punto clave se ha estado debatiendo durante medio siglo. La dificultad consiste en que las rayas de emisión ópticas, registradas a partir de la fotosfera, o "superficie" nominal de la estrella, no dan la verdadera velocidad de la estrella, debido a que la fotosfera es en realidad una envoltura gruesa, hecha de gases que se mueven hacia fuera con velocidades variables. Los observadores terrestres ven, como es obvio, sólo la parte de la fotosfera situada entre la estrella y la Tierra. Si se pudiera observar, de algún modo, la fotosfera del lado opuesto de la estrella y medir su velocidad, la media de ambas velocidades nos daría la de la propia estrella.

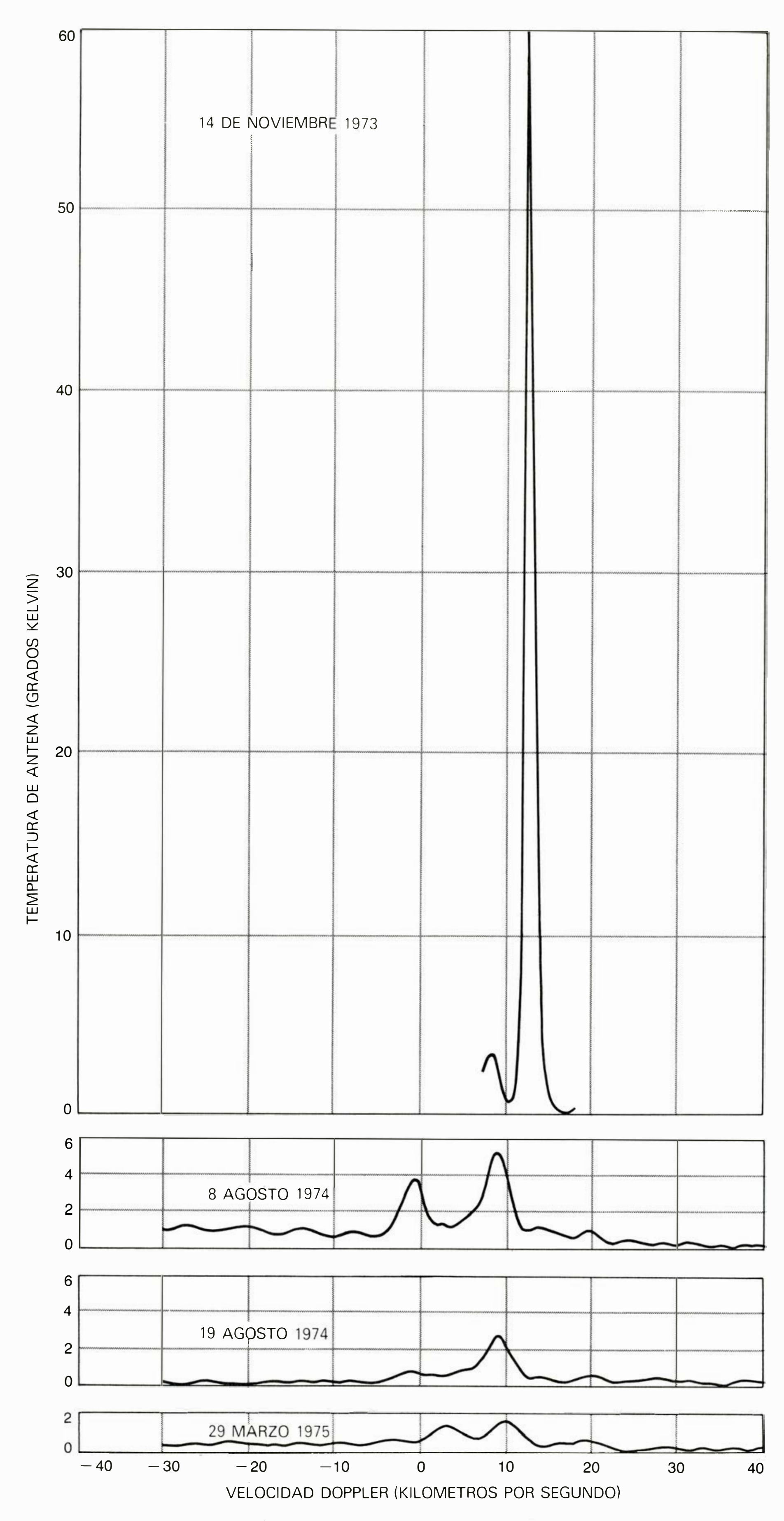
Esa artimaña se ha llevado a cabo ahora midiendo la velocidad Doppler de la radia-

ción térmica ordinaria (no la máser) de microondas emitida por la atmósfera circumestelar de gas de algunas estrellas rojas variables. Las moléculas de monóxido de silicio de la capa atmosférica son transparentes a su propia radiación, con lo cual pueden registrarse las rayas de emisión de monóxido de silicio a partir de todas las regiones de la capa de expansión, para ambos lados, tanto el próximo como el lejano. Puesto que la capa es eyectada de modo más o menos simétrico, la velocidad Doppler media debe representar la velocidad estelar. Cuando Mark J. Reid y yo medimos recientemente las rayas térmicas del monóxido de silicio en las estrellas máser, encontramos que la velocidad media de las rayas (y por lo tanto la velocidad estelar) caía, en cada caso, cerca del punto medio entre los dos picos del máser de hidroxilo. Este resultado confirma que los picos hidroxilo proceden de las regiones frontal y posterior de la capa circumestelar y ofrece una vía fácil para calcular la velocidad de una estrella, siempre que se detecte la reveladora emisión con doble pico de hidroxilo.

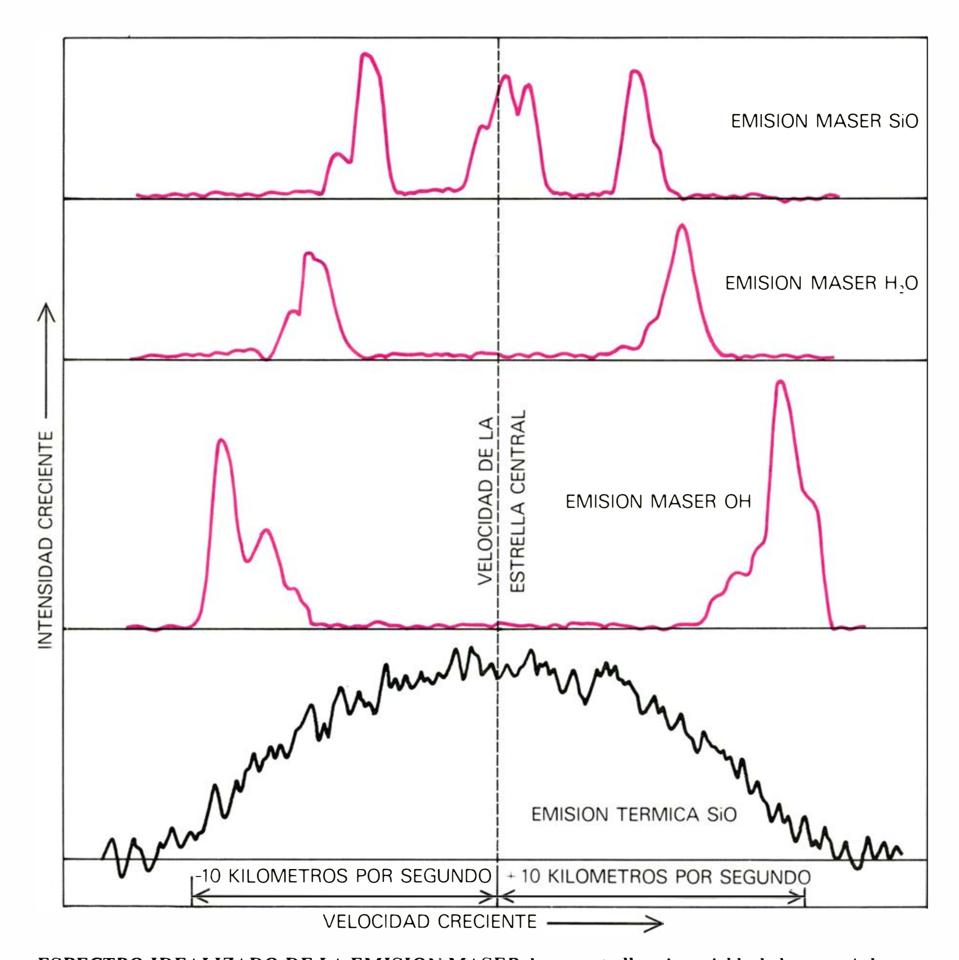
Nuestras observaciones sugieren que tal vez fuera posible detectar asimismo la emisión térmica a partir de moléculas de agua en torno a estrellas rojas variables. Sin embargo, una búsqueda reciente en ese sentido, llevada a cabo por Ann St. Clair Dinger, del Wellesley College, y sus colaboradores, ha resultado negativa. Para variables que presentan rayas de emisión máser de agua y de monóxido de silicio, las observaciones que acaba de realizar Susan G. Kleinmann, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han mostrado que los picos de emisión son, frecuentemente, simétricos en velocidad con respecto a la estelar, determinada esta última a partir de la emisión térmica del monóxido de silicio. Se establece, además, que las velocidades de las diversas moléculas tienden a apiñarse y a solaparse. Así pues, la dispersión de velocidades para las rayas del agua es menor que la dispersión para las rayas del hidroxilo y la del monóxido de silicio es, normalmente, menor que la del agua.

Esquema de una estrella máser

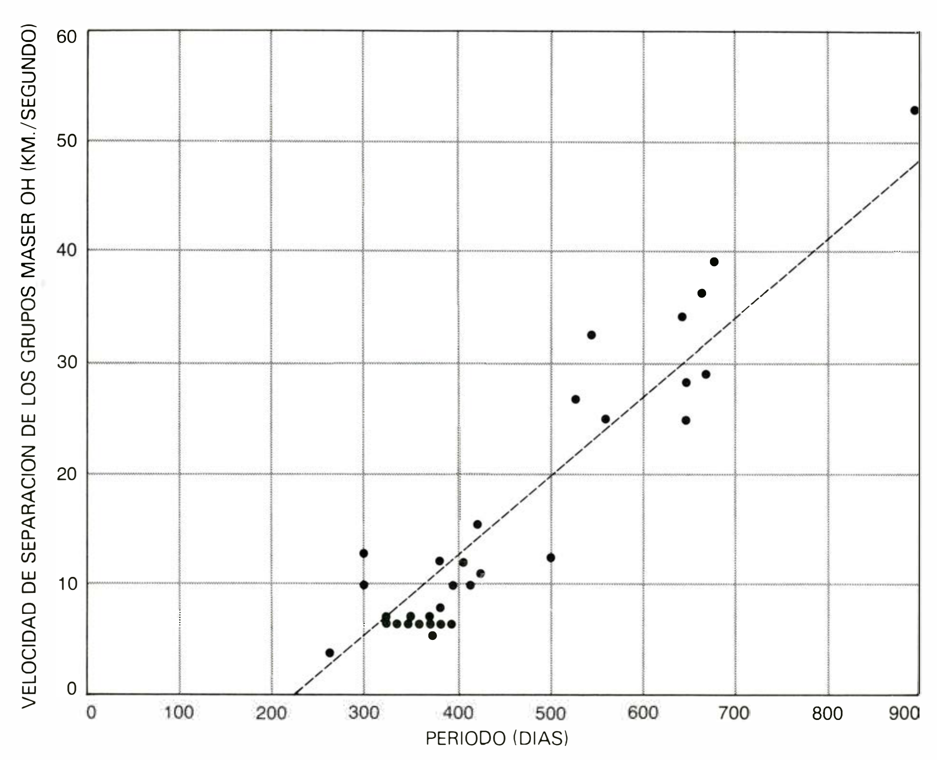
Intentemos ahora desarrollar un esquema de una típica estrella máser roja variable. El diámetro de la estrella central centuplica, varias veces, el diámetro del Sol. La atmósfera circundante posee un radio que está entre los 10^{10} y los 10^{11} kilómetros, esto es, unas 15 veces el radio del sistema solar. La presión de radiación de la estrella acelera la expulsión de gas y polvo hacia fuera, primero lentamente, luego de una manera mucho más rápida en una zona de transición, y, por último, lentamente de nuevo. En la zona de transición,



LA INTENSIDAD DEL MASER DE AGUA de la nebulosa brillante Messier 17 se alteró espectacularmente durante un período de 16 meses. Se registraron grandes cambios en cuestión sólo de 11 días. Los picos individuales y la repartición general indican dispersión de velocidades en las nubes que contienen el sistema máser. El propio máser emite a una sola frecuencia: 22.235 megahertz (1,35 centímetros). Los espectros fueron obtenidos por C. J. Lada, C. A. Gottlieb, E. L. Wright y el autor del trabajo, D. F. Dickinson.



ESPECTRO IDEALIZADO DE LA EMISION MASER de una estrella roja variable de largo período, que presenta picos de emisión *(color)* provenientes de tres tipos de máseres, espaciados de forma simétrica a cada lado de una velocidad media, presumiblemente la de la estrella central, que no puede establecerse de modo directo. Sin embargo, recientemente se ha observado la emisión térmica (no máser) del monóxido de silicio (SiO) de los gases que rodean a las estrellas máser. La velocidad media de la fuente térmica de monóxido de silicio, indicativa de la velocidad de la estrella, cae en medio de los picos del máser de hidroxilo *(negro).*



PERIODO DE LAS ESTRELLAS con máseres hidroxilo en sus atmósferas; se halla correlacionado con la separación en velocidad entre los picos de emisión del hidroxilo. Cuanto más largo es el período, mayor es la velocidad de separación. El ritmo de separación es el doble de la velocidad de expansión de la atmósfera.

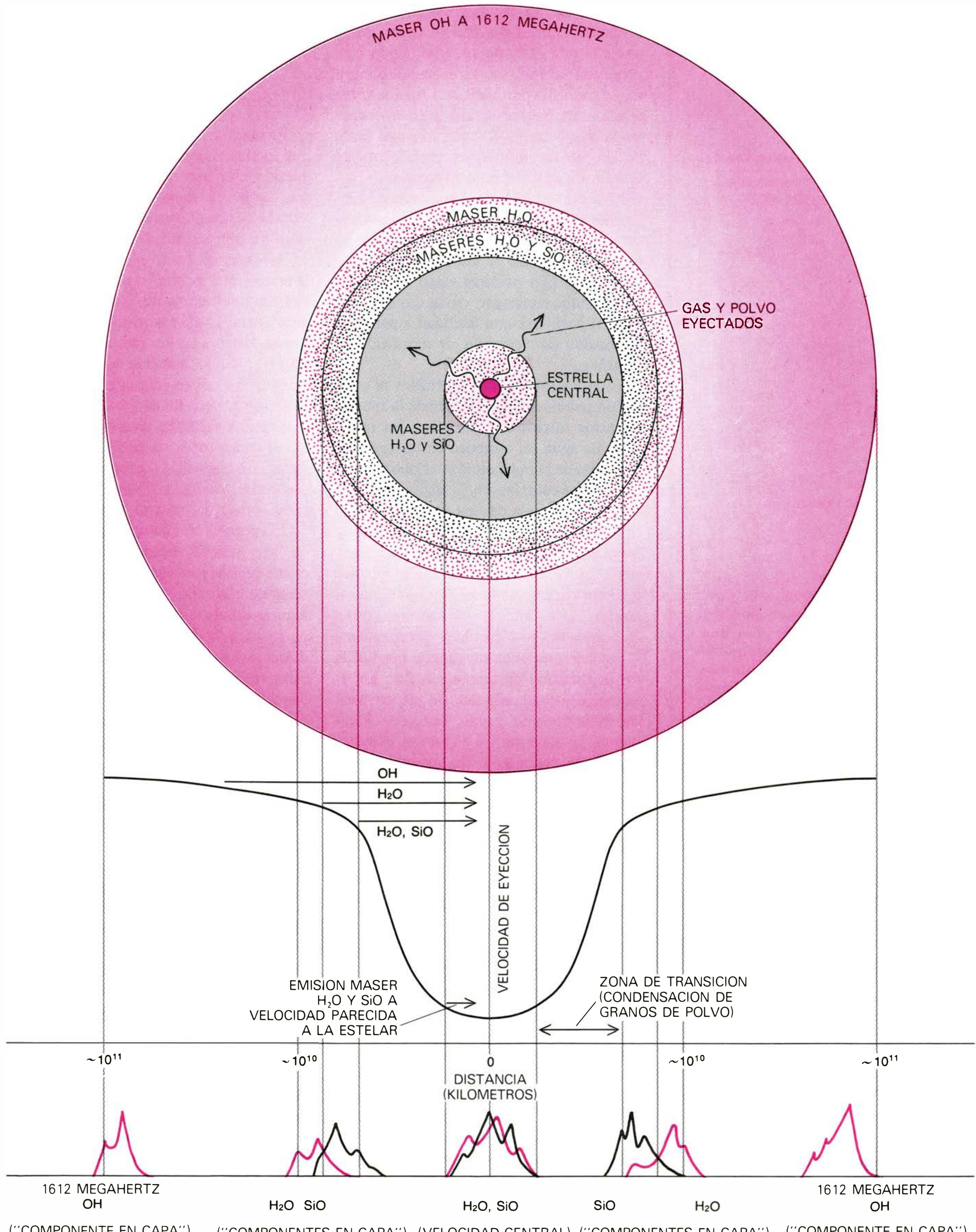
la temperatura es lo bastante baja para que el gas empiece a condensarse en polvo. Los granos de polvo, grandes, tienden a barrer el gas rápidamente hacia fuera, con lo que producen una gran aceleración, hasta que, a cierta distancia de la estrella, la presión de radiación ha caído en forma sustancial y el material de la capa se encuentra con gas interestelar y con otras fuerzas disipativas que detiene la aceleración.

Si la atmósfera va a albergar un máser de monóxido de silicio, éste aparecerá en una capa donde la temperatura del gas sea todavía considerable, posiblemente 1000 grados Kelvin. Las temperaturas adecuadas para un máser de agua son sólo ligeramente más bajas; de hecho, las capas que contienen ambos tipos de máseres suelen solaparse con frecuencia. Los máseres de hidroxilo se encontrarán en la parte más fría de la atmósfera circumestelar: en las regiones que se mueven a mayor velocidad, situadas más allá de los 10^{10} kilómetros. Dentro de la zona de transición, cerca de la estrella, los cambios rápidos de velocidad inhiben, evidentemente, la acción del máser.

El modelo que acabo de describir refleja la peculiar correlación entre la dispersión de velocidad en los picos de la emisión hidroxilo y el período de pulsación de la estrella. Simplificándolo todo, sabemos que las estrellas más luminosas tienen los períodos más largos. Por ser la presión de radiación función de la luminosidad, cabría esperar que las estrellas más brillantes, de mayor período, tuvieran las atmósferas con las capas externas, donde están situados los máseres de hidroxilo, en más rápido movimiento. Cuanto más de prisa se mueven las capas externas, mayor es la separación en velocidad entre un máser de hidroxilo situado en el lado de la estrella más próximo a nosotros y otro situado en el lado más lejano. Las densidades y temperaturas del gas localizado dentro de las capas no están todavía bien establecidas, y las estrellas reales son pocas veces tan regulares como el modelo que acabo de describir. Sin embargo, las observaciones de máseres estelares han suministrado claves, de la mayor importancia, para la comprensión de la índole general de las gigantes y supergigantes rojas variables.

Máseres interestelares

Además de los máseres naturales observados en las atmósferas de estrellas variables viejas, se encuentran también máseres en nubes moleculares asociadas con estrellas recién formadas o en proceso de constituirse. De hecho, cuando nubes interestelares de gran masa empiezan a colapsar bajo la influencia de la gravedad, los máseres son un jalón de la ruta evolutiva y apa-



REPRESENTACION ESQUEMATICA de una estrella roja variable que muestra la distribución aparente de los máseres de agua, de hidroxilo y de monóxido de silicio en las capas de la atmósfera. El gas y el polvo eyectados por la estrella son acelerados hacia fuera por presión de radiación. La curva en forma de U es un perfil de "velocidad del flujo saliente". Los máseres se encuentran en regiones donde el gas recibe una aceleración suave, no demasiado rápida. En la zona de transición, de aceleración rápida, las condiciones pueden resultar altamente inestables para que se formen máseres. Los perfiles de emisión máser están representados a las distancias radiales en que se forman, medidas a partir de la estrella. Sus velocidades relativas pueden sacarse de la curva de velocidad de flujo saliente. Como se explica en el texto, las emisiones máser que pueden observarse están confinadas en "casquetes" justo enfrente y detrás de la estrella.

recen cuando las primeras estrellas jóvenes brillantes empiezan a lucir a través de su envoltura de gas y polvo. Una región bien estudiada se inscribe en la nebulosa brillante conocida por Messier 17, en la constelación de Sagitario; allí se han encontrado dos máseres de agua intensos cerca de un objeto infrarrojo, probablemente una protoestrella que no es todavía lo bastante luminosa para ser observada en longitudes de onda visibles. Las regiones máser adyacentes puede que sean, por su parte, ubicaciones de nuevas estrellas, no detectadas. Los máseres están embebidos en una nube molecular, cuyas dimensiones pueden perfilarse con facilidad a partir de la emisión de moléculas de monóxido de carbono.

Esos máseres no están situados ni en la región nebulosa brillante, donde la intensa radiación ultravioleta disociaría las moléculas de agua, ni tampoco en las regiones más frías de la nube molecular obscura. Al parecer, se refugian en la región molecular, siempre cerca de una fuente de radiación infrarroja, que puede suministrar la energía de bombeo para el máser. En Messier 17, una de las regiones máser coincide con otra región donde las isofotas de la radiación de monóxido de carbono están amontonadas, lo cual indica posiblemente el paso de una onda de choque producida por la radiación ultravioleta estelar. La región de densidad reforzada de gas, en la estela de la onda de choque, puede estar iniciando la condensación de nuevas estrellas (véase "El nacimiento de las estrellas de gran masa", por Michael Zeilik; INVESTIGACION Y CIENCIA, junio de 1977). Tal especulación puede estar basada sólo en una coincidencia, pero se han observado otros varios máseres interestelares de agua en emplazamientos similares.

Con todo, se sabe menos acerca de los máseres interestelares que de los máseres en atmósferas de estrellas. Aunque en las regiones interestelares se encuentran tanto máseres de agua como de hidroxilo, su asociación es menos frecuente que en las atmósferas estelares. Además, cuando ambos tipos de máseres aparecen como vecinos en regiones interestelares, sus velocidades relativas no presentan ninguna relación sencilla. La molécula de monóxido de silicio es un conocido componente de las nubes moleculares, pero no ha sido nunca observado como máser interestelar.

Aunque las emisiones a partir de máseres interestelares varían de intensidad con tiempos característicos que van desde muchos meses hasta unos pocos días, las variaciones no presentan periodicidad aparente. En un caso se registraron abruptos cambios durante un período que dura 24 horas.

Esto contrasta con la intensidad del típico máser estelar de hidroxilo, cuyo nivel de actividad sigue de cerca los cambios de flujo luminoso de la estrella central.

Bombeo del máser interestelar

El mecanismo de bombeo de los máseres interestelares tampoco está bien establecido. Por analogía con el modelo estelar, se podría esperar que la energía de bombeo fuera la radiación infrarroja emitida por granos de polvo calentados o, tal vez, por un objeto protoestelar. Aunque ésta es una posibilidad viable, la radiación infrarroja no parece dar la inversión simétrica de los niveles de población que se observa en los máseres de hidroxilo estelares. En los máseres de hidroxilo interestelares está presente la emisión a 1612 megahertz, pero no es necesariamente dominante. A veces, las emisiones más intensas se dan a 1665 y a 1667 megahertz, las rayas características de la población normal de las moléculas. Suele observarse frecuentemente la raya de alta frecuencia a 1720 megahertz, que no se advierte nunca en los máseres estelares. Todo cuanto puede decirse con seguridad es que los máseres de hidroxilo y de agua se ven en los lugares donde la naturaleza monta el escenario para la formación de estrellas. El máser podría ser bombeado por radiación infrarroja, la cual está presente en abundancia, pero podría serlo también por radiación ultravioleta procedente de estrellas brillantes, recién formadas.

A juzgar por las pruebas, con todas sus actuales limitaciones, mi punto de vista personal –o prejuicio, si quieren– se inclina por la omnipresente radiación infrarroja como mecanismo de bombeo. Un modelo sencillo de bombeo por fotones infrarrojos no da, sin embargo, respuestas tan satisfactorias como en el caso de los máseres estelares. Un esquema completo debería considerar probablemente con cuidado el calentamiento de los granos de polvo de la nube y dar cuenta de las inhabituales diferencias observadas, como por qué razón el monóxido de silicio no aparece nunca como máser interestelar.

Nuestra representación global de la formación de las estrellas es, hoy por hoy, bastante convincente, por lo menos en un sentido cualitativo. El máser interestelar está presente en regiones donde se han formado nuevas estrellas; parece constituir una avanzadilla del nacimiento estelar. Y, en el caso de las variables de largo período, el máser es testigo de las convulsiones finales de una estrella moribunda. Una mejor comprensión de ambos tipos de máseres nos instruirá no sólo sobre la física de los máseres cósmicos, sino también acerca de la física de las estrellas y de la evolución estelar.

El modelado de los tejidos en los embriones

Las simulaciones del desarrollo mediante ordenador hacen posible llevar a cabo experimentos que no pueden realizarse en el laboratorio biológico. Ayudan a revelar algunas de las fuerzas básicas que esculpen el embrión

Richard Gordon y Antone G. Jacobson

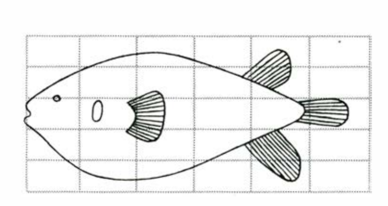
Después de la fertilización del óvulo de un organismo superior, éste se divide en muchos miles de células que se ordenan según capas tisulares del embrión. La comprensión de este elaborado proceso del desarrollo embrionario es uno de los problemas más difíciles y sobresalientes que desafían a los biólogos de hoy en día. El problema es tan complejo que debe fraccionarse en problemas más pequeños antes de que la investigación pueda rendir soluciones instructivas. Por esto, en nuestro trabajo, el propósito era responder a la pregunta general de cómo se modelan los tejidos en los embriones, analizando la formación de un solo tejido embrionario: la placa neural, el precursor más precoz del sistema nervioso central. El organismo que hemos escogido para este fin es el tritón de California, *Taricha torosa,* indígena de los estanques y arroyos de los alrededores de la Bahía de San Francisco.

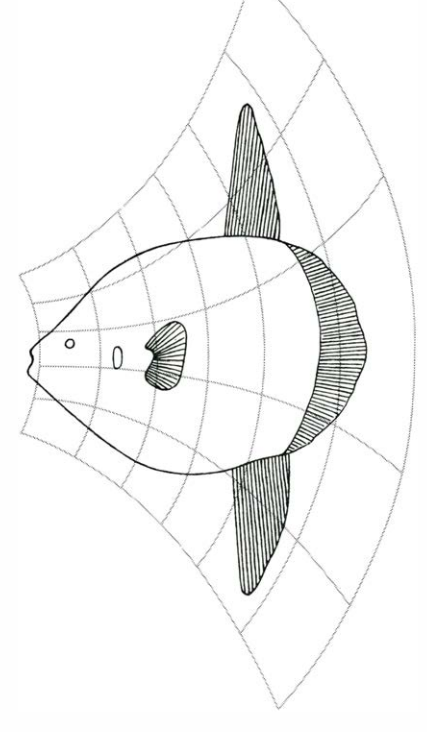
En los primeros estadios del desarrollo, las sucesivas divisiones del óvulo fecundado del tritón dan lugar a una bola hueca, de una sola capa de células, llamada blástula. Luego, la mitad del tejido se introduce a través de una hendidura en la blástula, formando en el embrión esférico dos capas: el endodermo y el mesodermo. El embrión se llama ahora gástrula. Una hemisfera de la capa más externa de la gástrula es la destinada a convertirse en la placa neural. En el curso de unas 30 horas, esta hemisfera se aplana en forma de disco, tomando luego la forma de un ojo de cerradura. La porción ancha del ojo de cerradura da lugar finalmente al cerebro y la parte estrecha a la médula espinal.

En el curso de la transformación de la placa neural desde la fase de disco hasta la fase de ojo de cerradura, sus células constituyentes se mueven según un complejo patrón espacial y temporal. Al abordar el análisis de este patrón nos servimos de una simulación mediante ordenador para comprobar la idoneidad de diferentes modos de comportamiento celular para explicar los cambios observados en la modelación del tejido. Escribir el programa de simulación requería que expresáramos el comportamiento de las células cuantitativamente y que explicitáramos todas nuestras suposiciones. Estos requerimientos condujeron a su vez a observaciones más precisas del embrión vivo. A través de tal proceso de simulación alternando con la observación, empezamos a discernir las fuerzas implicadas en la modelación de la placa neural (y por analogía en el modelado de otros muchos tejidos embrionarios).

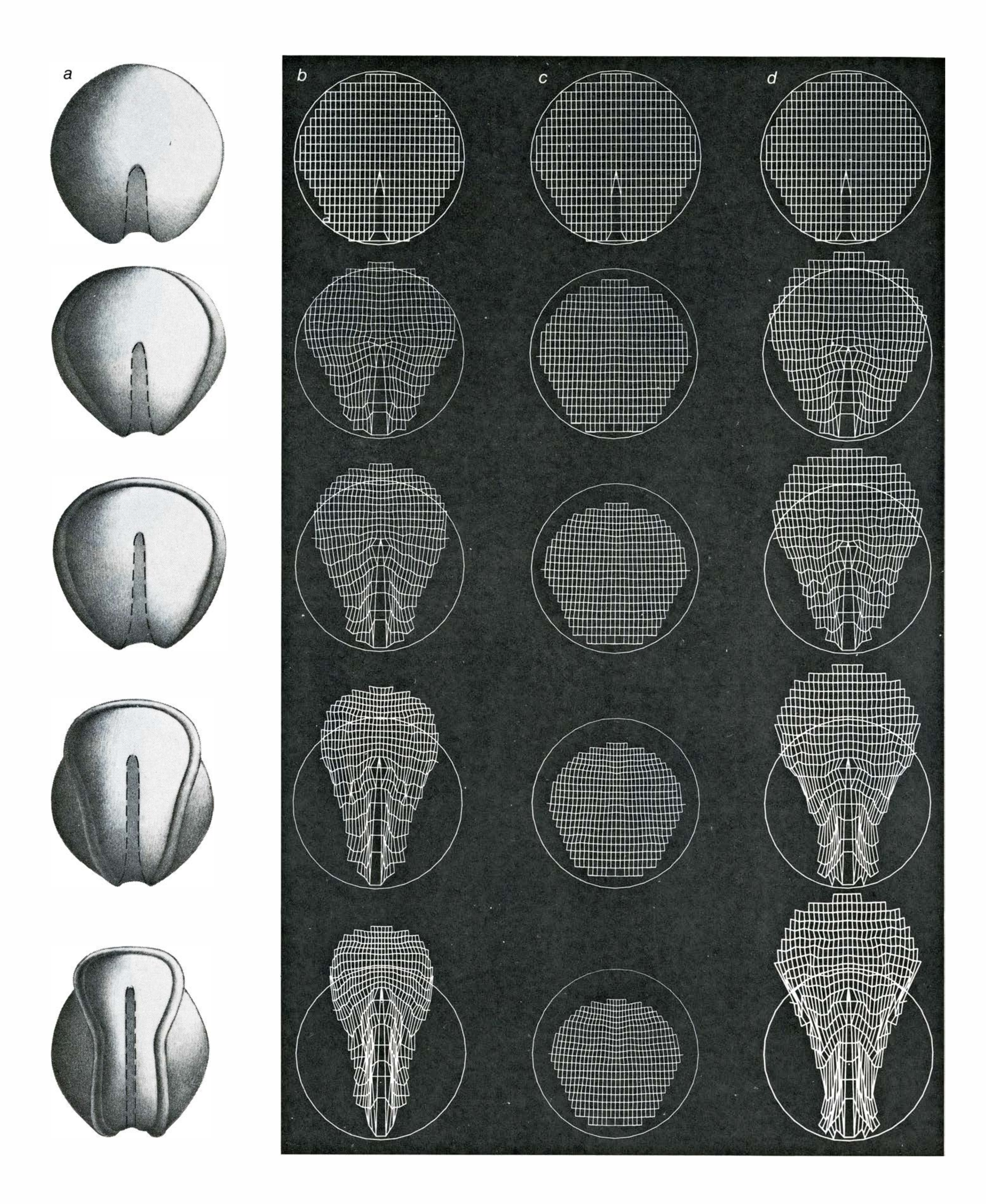
Se escogió el embrión de tritón por una serie de razones. Es resistente y tolerante a la cirugía experimental, y su placa neural tiene un grosor unicelular, haciendo relativamente fáciles la observación y los análisis. Las células embrionarias del tritón son lo bastante grandes para ser examinadas con un microscopio de disección de bajos aumentos y contienen cantidades variables de pigmento obscuro, de manera que se pueden identificar células individuales y seguir su desarrollo sin necesidad de colorantes u otros marcadores. Además, cada célula embrionaria contiene su propio suministro de reserva alimenticia (restos de vitelo), de modo que es posible cultivar grupos de células embrionarias o incluso células aisladas en soluciones salinas simples.

Los fundamentos matemáticos de nues-

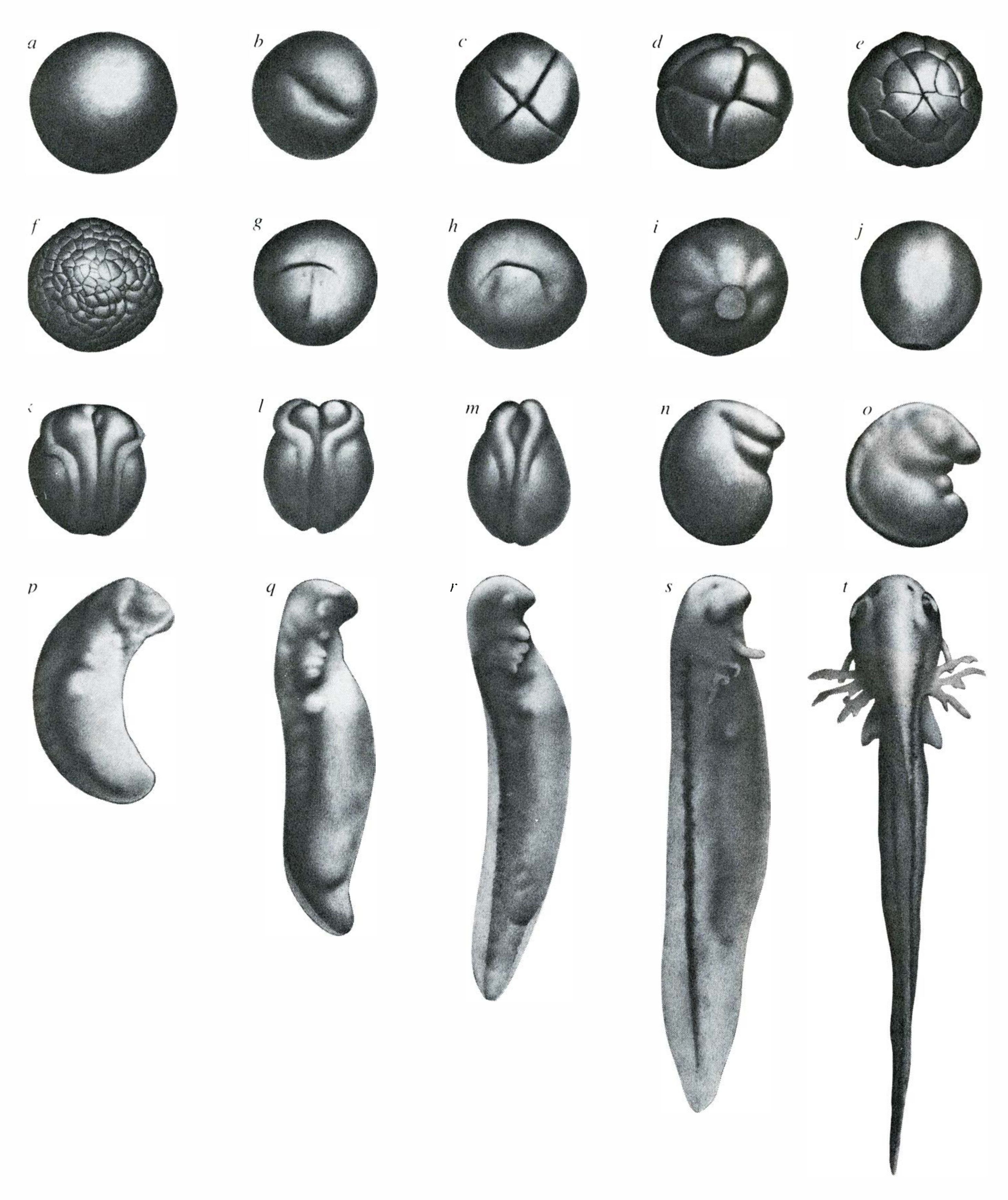




METODO DE TRANSFORMACION de una rejilla, ideado por el biólogo escocés D'Arcy Wentworth Thompson. Este demostró que los organismos relacionados podían ser representados como distorsiones relativamente simples de uno respecto a otro. La ilustración, basada en un trabajo de Thompson de 1917, ***On Growth and Form,*** **pone de manifiesto las relaciones geométricas entre el pez erizo,** ***Diodon (izquierda),*** **y la rueda,** ***Orthagoriscus mola (derecha).*** **El método de la transformación de una rejilla de Thompson sirve para comprender las fuerzas que modelan las láminas de células en las distintas capas de tejido del embrión.**



SIMULACIONES POR ORDENADOR desarrolladas por los autores para describir la formación, en el embrión, de la placa neural, el precursor más precoz del sistema nervioso central. El modelado del tejido está representado como la distorsión de una rejilla geométrica colocada sobre el embrión. La columna *a* muestra una secuencia de diagramas esquemáticos de la placa neural en desarrollo, sacada de una serie de imágenes tomadas a intervalos. La columna *b* muestra una simulación por ordenador que incorpora dos fuerzas: contracción no uniforme de las células de la placa neural y elongación de la región supranotocordal a lo largo de la línea media de la placa neural. La forma resultante de la rejilla transformada es prácticamente idéntica a la vista en el embrión. En la columa *c* la elongación supranotocordal ha sido bloqueada, de modo que la única fuerza es proporcionada por la contracción celular; la rejilla resultante se ha reducido de tamaño, pero no alcanza la forma en ojo de cerradura. En la columna *d* se ha bloqueado la contracción celular, la única fuerza actuante es la producida por la elongación supranotocordal. Este experimento no pudo llevarse a cabo con el embrión vivo. Aunque la rejilla sí que alcanza la forma de ojo de cerradura, el extremo anterior tiene un tamaño excesivo. Por tanto, la contracción celular como el desplazamiento celular parecen ser los que dan forma a la placa neural.



ALGUNOS ESTADIOS DEL DESARROLLO del tritón de California *Taricha torosa*. Se trata de una versión abreviada de una secuencia preparada por Victor C. Twitty y Dietrich Bodenstein, de la Universidad de Stanford. En primer lugar el óvulo fecundado se divide muchas veces *(a-f)*, dando lugar a una esfera hueca de células o blástula. Entonces aparece un surco por debajo del ecuador del embrión *(g)* que gradualmente profundiza para formar una espaciosa cavidad interna, mientras que se desplaza cada vez más tejido superficial hacia el interior *(h, i)*. Este proceso, llamado gastrulación, da lugar a dos capas internas de tejido: el endodermo y el mesodermo. El endodermo forma más tarde, entre otras cosas, el revestimiento intestinal. El mesodermo constituye más tarde la musculatura esquelética, el notocordio (una varilla situada por debajo del sistema nervioso embrionario) y otros órganos. Luego, una de las hemisferas de la capa más externa del embrión se aplana a modo de disco (*j*) y se convierte en la placa neural en forma de ojo de cerradura (*k*). Al mismo tiempo, la región supranotocordal de la placa neural y el notocordio subyacente sufren una considerable elongación y estrechamiento a lo largo de la línea media. En los estadios sucesivos, la placa neural se enrolla para formar el tubo neural (*l-n*), los ojos se desarrollan y el embrión se alarga tomando la forma larvaria (*o-t*). Las imágenes *a-f* muestran la parte superior del embrión, las *g-i* muestran la parte inferior, *j-m* y *t* constituyen una visión dorsal y *n-s* una visión lateral. El embrión de tritón se presta particularmente a análisis cuantitativos, dado que es resistente y bastante grande en cuanto a tamaño.

tra simulación por ordenador nos llevan al trabajo de D'Arcy Wentworth Thompson, de la Universidad de St. Andrews, al doblar el siglo. En 1917, Thompson publicó su trabajo clásico *On Growth and Form,* en el que proponía que la transformación evolutiva de una especie en otra es un proceso que compromete al organismo entero más que a sucesivas alteraciones menores en las partes del cuerpo. Thompson representó la transformación como la distorsión geométrica de una rejilla colocada sobre el organismo, dando lugar a importantes cambios en las relaciones espaciales. Consecuentemente, dos organismos que posean un antecesor común, tendrán formas que están relacionadas por una transformación que, a menudo, es simple. El método de Thompson de la transformación geométrica se ha mostrado muy útil al analizar matemáticamente la modelación de los tejidos embrionarios.

En 1968, Mary Beth Burnside, que trabajaba a la sazón en la Universidad de Texas en Austin, analizó el movimiento de células individuales pigmentadas en embriones de tritón en desarrollo, siguiendo las células en las intersecciones de una rejilla de D'Arcy Thompson superpuesta. Mediante imágenes tomadas a intervalos, determinó cómo se distorsionaba la geometría de la rejilla durante la formación de la placa neural. La transformación era considerablemente constante de un embrión al siguiente: cuando superponía las rejillas de D'Arcy Thompson transformadas, correspondientes a tres embriones distintos, coincidían casi exactamente. También observó que la distorsión de la placa neural se correlacionaba con la contracción de las superficies libres de las células y que el grado de contracción variaba sobre la superficie de la placa. Al contraerse la placa, el área superficial de cada célula se mantenía inversamente proporcional a su altura (su dimensión perpendicular a la lámina). Además, el incremento en altura ocurría sin crecimiento, permaneciendo constante el volumen de la placa neural durante la transformación.

Se comprende hasta cierto punto el mecanismo por el cual las células de la placa neural se alargan o aumentan su altura y, por ende, reducen su área superficial libre. Con la ayuda del microscopio electrónico, Burnside observó unos microfilamentos contráctiles dispuestos como la cuerda de una bolsa alrededor del extremo libre de cada célula. La contracción de los microfilamentos parece ser responsable de la reducción de la superficie libre de la célula. Unas fibras mayores, los microtúbulos, están orientadas a lo largo de la célula y son esenciales para su alargamiento.

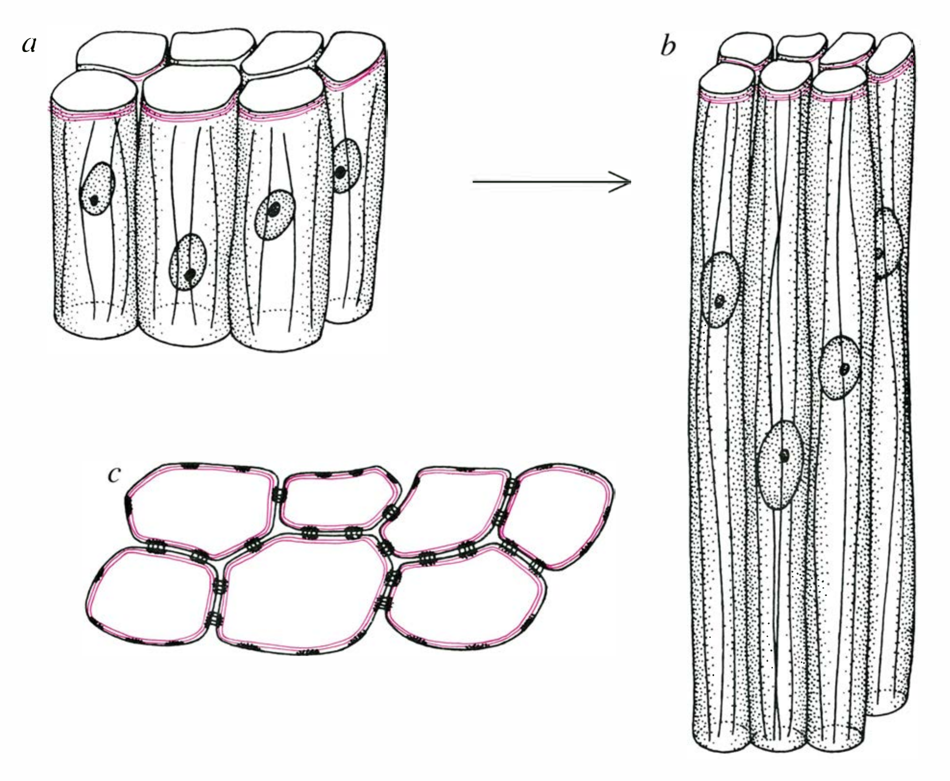
Sobre la base de las observaciones de Burnside, intentamos idear un modelo matemático de la placa neural como una lámina de células, cada una de las cuales se alargaba perpendicularmente a la lámina, mientras mantenía un volumen constante. Al formular un modelo cuantitativo del comportamiento de una célula de la placa neural, teníamos que saber si el aumento en altura era influido o no por el comportamiento de las células vecinas. A tal fin, trasplantamos pequeños grupos de células de la placa neural de un área a otra de la misma, donde se alargaron de acuerdo con sus posiciones originales. En 1946, Johannes Holtfreter, que trabajaba en la Universidad McGill, aisló células individuales de la placa neural y observó que continuaban alargándose cuando eran cultivadas en recipientes de laboratorio. Su observación ha sido confirmada por Burnside. Por tanto, el alargamiento es una propiedad intrínseca de cada célula: la célula aumentará su altura en un grado característico dondequiera que esté. Cada célula de la placa neural puede considerarse como una entidad autónoma cuyo "programa de altura", o futuro curso de alargamiento, ha sido determinado con anticipación.



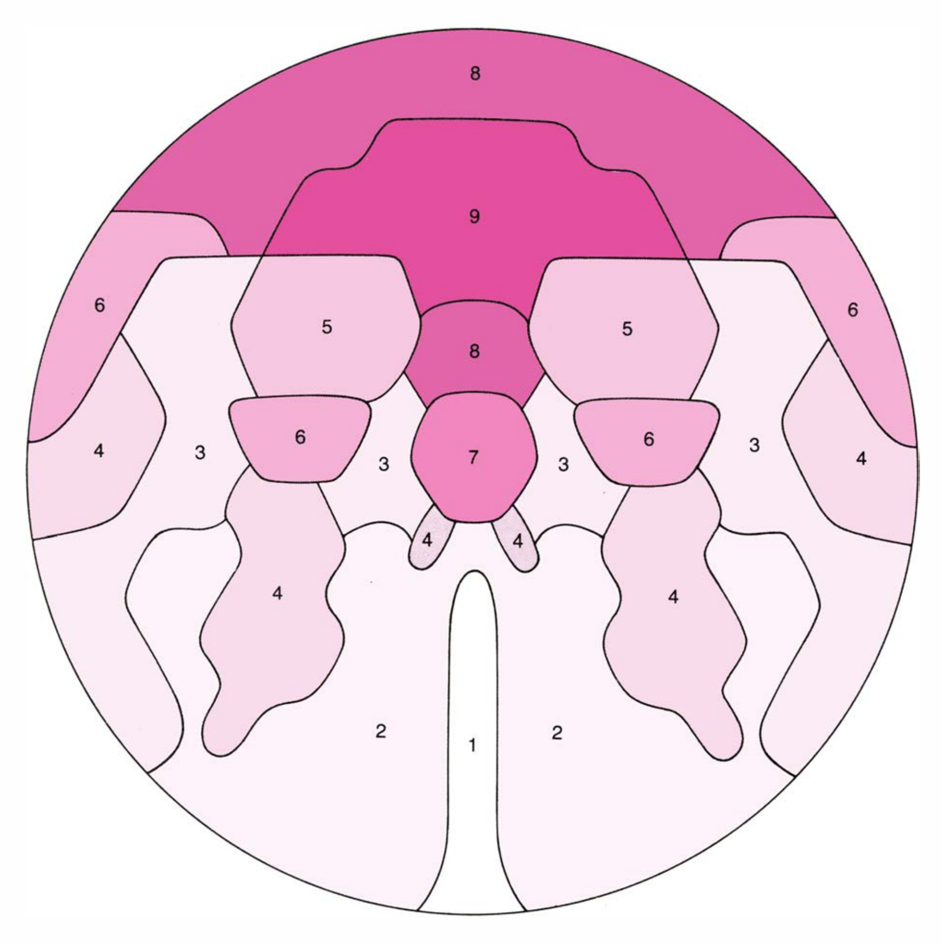
EMBRION DE TRITON, aumentado 40 veces (el embrión tiene 2,4 milímetros de diámetro). La estructura en forma de ojo de cerradura en el centro del embrión es la placa neural. La parte ancha del ojo de la cerradura está destinada a convertirse en el cerebro y la parte estrecha en la médula espinal. Puesto que la placa neural del tritón consta de una sola capa de células, proporciona un sencillo pero representativo sistema para examinar cómo se forman los tejidos en el embrión. Además, la cantidad de pigmento pardo varía de una célula a otra, lo cual permite seguir los movimientos de grupos individuales de células a bajos aumentos.

Obtuvimos los programas de altura de diferentes células de la siguiente manera. Primero medimos las alturas de las células en la fase de disco en embriones seccionados, y entonces nos servimos de imágenes tomadas a intervalos para ver dónde se habían colocado las células correspondientes en la fase de ojo de cerradura. (¡Algunas células llegaron a desplazarse hasta 0,9 milímetros a través de un embrión de 2,4 milímetros!) Luego seccionamos una placa neural en forma de ojo de cerradura y medimos las actuales alturas de las células nuevamente colocadas.

Nuestra descripción matemática de una célula de la placa neural constaba de cinco



EL ALARGAMIENTO Y LA CONTRACCION de las células de la placa neural generan fuerzas que ayudan a que el tejido tome su forma. Aquí se muestran las células de la placa neural inmediatamente después de la gastrulación (*a*) y tras el cierre del tubo neural (*b*). Cada célula más o menos cilíndrica se alarga perpendicular a la lámina, mientras que mantiene un volumen celular constante; de ello resulta que su área superficial libre disminuye. Al estar acoplados los haces de microfilamentos (*color*) de cada célula a los de las adyacentes, la contracción de una célula estira las otras células hacia sí, dando nueva forma a la lámina (*c*).



PATRON DE ALARGAMIENTO CELULAR en la placa neural. Como se desprende de este mapa, resulta bastante complejo. El grado preciso con que cada célula se alarga (su "programa de altura") varía considerablemente con la localización de la célula en la placa neural. Aquí se han agrupado los programas de altura en nueve clases, distintas según la tasa de alargamiento celular. La clase más rápida es la del número 9.

cantidades: dos coordenadas espaciales para la situación de la célula, la altura inicial de la célula, su volumen y su programa de altura (que se colocó en una de nueve clases de acuerdo con la tasa de elongación de la célula). El patrón de contracción de la placa podía así ser representado como patrón de diferentes programas de altura distribuidos sobre la placa en forma de disco *(véase la ilustración inferior de la izquierda)*. El patrón resultó bastante complicado.

Al principio pensamos que el patrón de contracción por sí solo podía ser suficiente para explicar el modelado de la placa neural. Comprobamos esta hipótesis experimentalmente, por modelos matemáticos y por simulación mediante ordenador. En nuestros experimentos extrajimos quirúrgicamente la placa neural en forma de disco del embrión, y la dejamos crecer en un cultivo tisular. La superficie de la placa neural aislada se contrajo, pero la forma resultante estaba sólo ligeramente estrechada en el extremo posterior y se parecía muy poco a la esperada forma en ojo de cerradura. Razonamos entonces que si cada célula estira isotrópicamente (es decir, por igual en todas direcciones) al tiempo que se contrae, el ángulo de intersección entre dos líneas dibujadas sobre la lámina de células no debería cambiar. En términos matemáticos, una transformación de este tipo se llama conforme. Sin embargo, sabíamos que sí ocurrían grandes cambios de ángulo en algunas regiones de la rejilla de D'Arcy Thompson durante la transformación de la placa neural, indicando que el cambio de forma era no conforme.

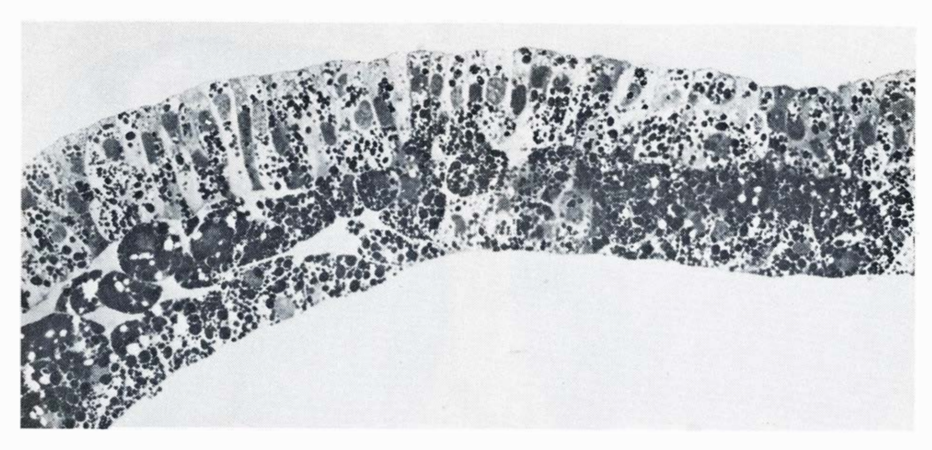
Nuestra simulación por ordenador nos llevó a la misma conclusión. Hicimos un modelo de la placa neural como si estuviera formada por unas 300 "unidades de contracción", siendo cada unidad un cilindro representando un grupo de unas 30 células. Cuando ejecutamos el programa en el ordenador, permitiendo que el patrón de contracción deformara la rejilla de D'Arcy Thompson, la placa neural simulada no alcanzó la forma de ojo de cerradura, sino que simplemente se hizo más pequeña, parejamente a lo que había ocurrido con la placa neural aislada y crecida en cultivo tisular *(véase columna c en la ilustración de la página 61)*. Por tanto, pareció claro que ningún patrón de contracción por sí mismo podía dar lugar a la forma en ojo de cerradura y empezamos a buscar una segunda fuerza.

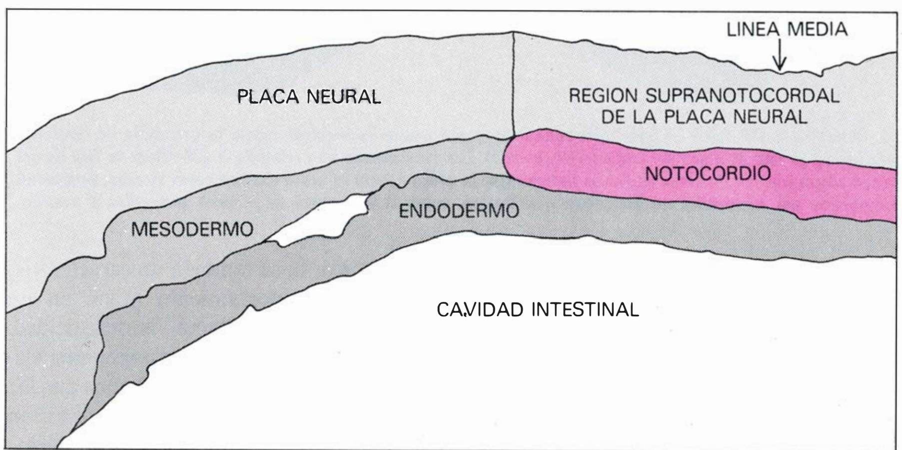
Los cambios de ángulo en la rejilla de D'Arcy Thompson de la placa neural transformada sugerían la existencia de una fuerza de deslizamiento que movía algunas células con respecto a otras. En la búsqueda de lo que podía generar una fuerza de tal tipo hicimos una minuciosa observa-

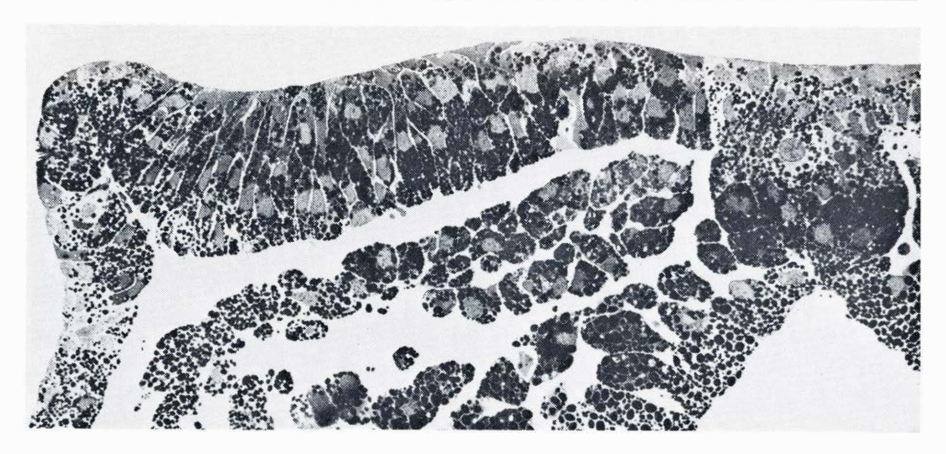
ción del notocordio, que es parte del tejido mesodérmico subyacente a la placa neural. En los embriones más maduros, el notocordio es una varilla que discurre prácticamente a lo largo de todo el embrión por debajo de la médula espinal y del cerebro. En los estadios de placa neural, el notocordio es una lámina plana de células que está en proceso de convertirse en una varilla. Carl-Olof Jacobson y Jan Löfberg, de la Universidad de Uppsala, han mostrado que aunque las células mesodérmicas seguían pasos similares a los de las células suprayacentes de la placa neural durante la formación de la placa, sólo las células notocordales seguían con exactitud los pasos de las células suprayacentes. Además, encontramos que las células del notocordio se adhieren estrechamente a las células de la placa neural suprayacente, mientras que el resto del mesodermo no lo hace. Esta ligazón mecánica quedó comprobada cuando tratamos de separar las dos capas de tejido. Hemos dado el nombre de región supranotocordal a la parte de la placa neural que yace sobre el notocordio.

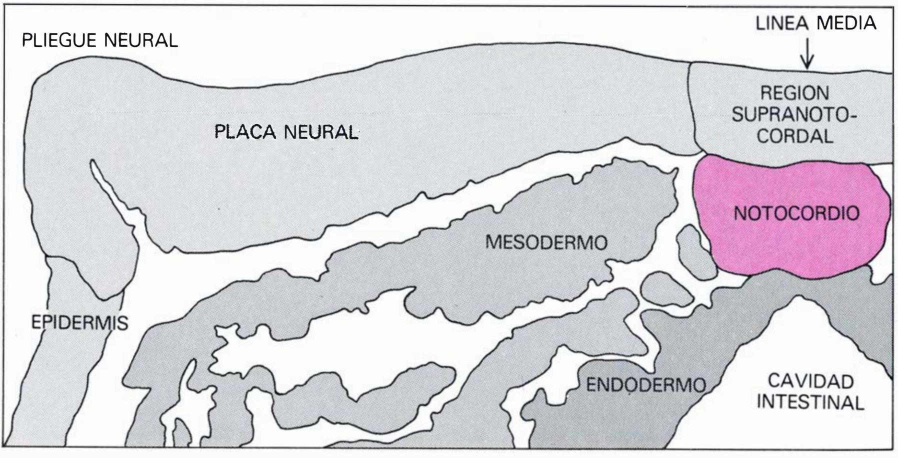
Si extraíamos la placa neural del embrión junto con el notocordio y la hacíamos crecer aisladamente, resultaba una forma en ojo de cerradura normal. Si, por otro lado, dejábamos la placa neural unida al embrión y extraíamos el notocordio separándolo por disección desde abajo, la forma en ojo de cerradura no aparecía. De manera similar, si se aislaba de la placa neural el propio notocordio y se desarrollaba en cultivo, las células no se reorganizaban para dar lugar a una varilla. Llegamos a la conclusión de que las células del notocordio y de la región supranotocordal de la placa neural se mueven sincrónicamente, pero que ninguno de estos conjuntos celulares puede ejecutar estos movimientos aisladamente. Por ello, nuestro paso siguiente fue incorporar la elongación de la región supranotocordal a nuestra simulación por ordenador.

Al programar la simulación teníamos que encontrar un medio para mantener juntas las unidades de contracción con el fin de representar una lámina continua de células. Las unidades vecinas fueron conectadas mediante "enlaces", diseñados como si se tratara de bandas de goma elástica. Pronto surgieron problemas con este enfoque. Al disminuir el tamaño de las unidades de contracción y al alargarse la región supranotocordal, algunos enlaces fueron estirados hasta longitudes que normalmente no podían alcanzar las células en el embrión. Tal estiramiento parecía apuntar hacia la posibilidad de la existencia de tensiones no relajadas en la placa neural. Buscamos signos de estas tensiones en el embrión practicando pequeñas hendiduras en la placa neural. Como habíamos an-

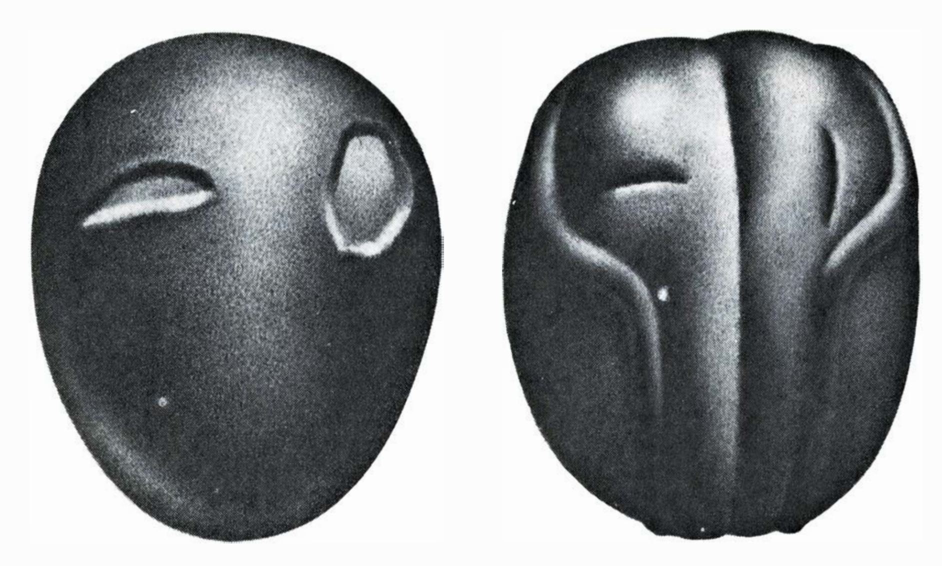








SECCIONES TRANSVERSALES del embrión de tritón en dos estadios de su desarrollo; nos ilustran las relaciones entre la placa neural y las capas de tejido subyacentes. La micrografía de la parte superior muestra los tejidos de un embrión que acaba de completar su gastrulación; son visibles la placa neural, el mesodermo y el endodermo. La micrografía de la parte inferior corresponde a un embrión con una placa neural en forma de ojo de cerradura. Nótese que, entre los dos estadios, las células de la placa neural se han alargado, mientras que las del notocordio y región supranotocordal han convergido a lo largo de la línea media.



EL BOSTEZO DE LAS LESIONES cuando la placa neural es hendida revela la presencia de tensiones internas en la fase de disco del embrión (*izquierda*). Las tensiones se han relajado cuando llega la fase de ojo de cerradura (*derecha*). Estas tensiones indican que la placa neural es tanto elástica como viscosa, propiedad compartida por materiales no biológicos que fluyen, como si se tratara de metales sometidos a presión.

ticipado, las tensiones en la placa durante la fase de disco ocasionaron el bostezo de las hendiduras. En la fase de ojo de cerradura, sin embargo, cuando se practicaron hendiduras, no se abrieron, indicando que las tensiones de la placa neural se habían relajado. De modo que la placa neural no se comporta simplemente como un material elástico; tiene también un carácter viscoso. Tal comportamiento mixto en un material o fluido se llama viscoelasticidad.

Con el fin de diseñar el componente viscoso de la placa neural, permitimos que los enlaces entre las unidades de contracción se rompieran cuando llegaran a ser demasiado largos; la longitud de rotura se obtuvo de una medida empírica del alargamiento máximo observado en las células del embrión. Se dejó entonces que las unidades de contracción separadas se juntaran con nuevas unidades vecinas. Este cambio de vecinos entre las unidades permite el componente viscoso del flujo y explica el deslizamiento observado.

Encontramos que, combinando el patrón de contracción y los movimientos de la región supranotocordal en nuestra simulación, podíamos obtener una rejilla de D'Arcy Thompson transformada que era prácticamente idéntica a la forma en ojo de cerradura observada en el embrión. Queríamos saber, sin embargo, si la segunda fuerza por sí sola podía ser suficiente para efectuar la transformación. Desafortunadamente no pudimos comprobar esta hipótesis por vía experimental, ya que no conocíamos ningún medio para evitar la contracción de las células de la placa neural sin incidir en el movimiento de la región supranotocordal. No obstante, fue sencillo el modificar la simulación por ordenador bloqueando la contracción al alargarse la región supranotocordal. Aunque la rejilla transformada de D'Arcy Thompson resultante tenía forma de ojo de cerradura, su extremo anterior tenía un tamaño excesivo *(véase la columna d de la ilustración de la página 61)*. Por ello, concluimos que tanto el patrón de contracción como la elongación de la región supranotocordal eran necesarios y suficientes para explicar el modelado de la placa neural.

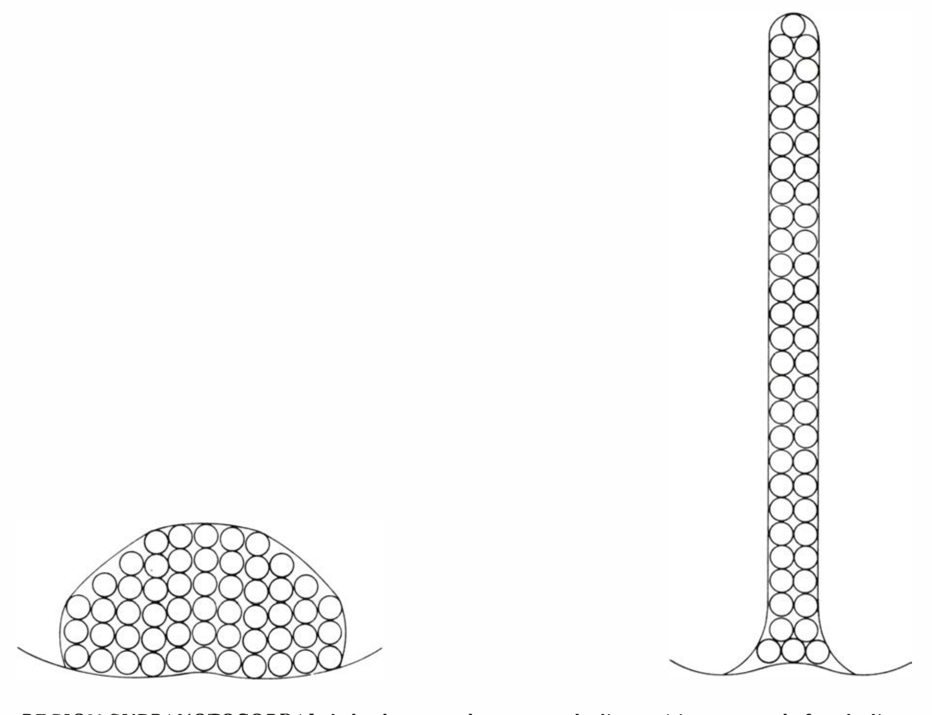
En los animales vertebrados el papel principal del notocordio estriba, aparentemente, en participar en la formación del sistema nervioso del embrión. Una vez ha aparecido la columna vertebral, el notocordio no tiene ya ninguna función y se desintegra en gran parte.

Tres vías de prueba nos llevan a la conclusión de que el deslizamiento se presenta en la placa neural: la no conformidad de la transformación de la rejilla de D'Arcy Thompson, la necesidad de introducir la viscoelasticidad en nuestro modelo para ordenador y las observaciones directas de grupos de células que cambian sus vecinos. Hay por lo menos dos regiones de la placa neural donde se puede localizar el deslizamiento: en la región supranotocordal y en la frontera entre la placa neural y la epidermis (el resto de la capa externa del embrión). En esta última región, las células de la placa neural que se están contrayendo con rapidez se hallan yuxtapuestas a las células epidérmicas que en este momento se aplanan y aumentan su área superficial libre. Como resultado se forma una abrupta barrera a lo largo de la cual puede desarrollarse el deslizamiento *(véase la ilustración inferior de esta misma página)*. El desliza-

LAS LINEAS DE DESLIZAMIENTO en el embrión son generadas en la interfase entre una lámina de células cuya área superficial se está contrayendo y una lámina adyacente de células cuya área superficial permanece constante o que incluso aumenta. Esta simulación por ordenador muestra un ejemplo simplificado de una interfase del tipo mencionado, con deslizamiento (el cambio de vecinos celulares) en los bordes doblados hacia abajo. El deslizamiento ocurre a lo largo de la línea media de la placa durante la elongación de la región supranotocordal y en la frontera entre placa neural y epidermis (resto de capa externa del embrión).

miento masivo entre las células de la placa neural en la región supranotocordal puede desempeñar un papel principal subdividiendo la placa neural en dos mitades bilaterales simétricas.

La cuestión de por qué surgen abruptas barreras entre los dominios celulares no está resuelta en gran parte, pero las líneas de deslizamiento entre las células puede ser un factor importante. Diversos investigadores, entre ellos Edwin J. Furshpan y David D. Potter, de la Facultad de Medicina de Harvard, y Werner R. Loewenstein, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Miami, han encontrado que la mayoría de células del embrión se comunican eléctrica y químicamente por medio de adhesiones permeables entre sus membranas más externas, llamadas uniones estrechas o herméticas "gap junctions" (véase "Uniones intracelulares", por I Andrew Staehelin y Barbara E. Hull; INVESTIGACION Y CIENCIA, julio). Los iones e incluso moléculas bastante grandes pueden pasar libremente entre las células acopladas, y esta comunicación celular puede representar un importante papel en la formación de dominios celulares que muestran un comportamiento coordinado durante el desarrollo embrionario. Las células de la placa neural forman uno de estos dominios; las células de la epidermis constituyen otro. El deslizamiento puede cortar o alterar la función de las uniones estrechas o herméticas entre las células en la frontera entre la placa neural y la epidermis, dando lugar a su separación funcional. Esta separación podría dar lugar, a su vez, a un diferente desarrollo subsiguiente en cada uno de los dos dominios celulares aislados.



REGION SUPRANOTOCORDAL de la placa neural, representada diagramáticamente en la fase de disco de la placa neural (*izquierda*) y en la fase de ojo de cerradura (*derecha*). Los círculos simbolizan igual número de células. Al elongarse y estrecharse la región supranotocordal a lo largo de la línea media de la placa neural, las células del interior de la región plana se intercalan para tomar posiciones en la periferia. El diagrama ilustra, con cierto detalle, el fuerte deslizamiento que se halla implicado en el cambio de forma.

Una vez se ha formado la placa neural plana, se enrolla a modo de tubo. El efecto dominante puede ser la elongación de la región supranotocordal, que en este momento aumenta en diez veces su tasa de elongación. Si se estira una lámina elástica, por ejemplo una fina lámina de goma o plástico, a lo largo de una línea, se abarquillará saliéndose del plano y formará un tubo. Estamos ahora aventurándonos en una nueva simulación mediante ordenador para comprobar si este fenómeno podría dar o no explicación cuantitativa de la formación del tubo neural.

Al proyectar nuestra simulación por ordenador de la placa neural, advertimos la analogía entre su formación y el fluir de materiales no biológicos, como los metales. Las ramas de la física que tratan del flujo de materiales son la hidrodinámica y la disciplina más general de la mecánica del continuo. No obstante, hay dos diferencias principales entre la hidrodinámica ordinaria y el flujo de tejidos durante el desarrollo (que hemos propuesto llamar morfodinámica). En primer lugar, los fluidos ordinarios son pasivos, respondiendo a las fuerzas aplicadas sobre ellos, mientras que las fuerzas que conducen la corriente de tejidos son generadas por las propias células. En segundo lugar, la mayoría de fluidos son espacialmente uniformes en sus propiedades intrínsecas, mientras que las propiedades fluidas de un tejido son altamente no uniformes, como queda manifiesto por la complejidad del patrón de contracción en la placa neural. Además, la complejidad de la morfodinámica la hace matemáticamente intratable y la coloca en los límites del poder descriptivo de la hidrodinámica, incluso disponiendo de ordenadores de alta velocidad.

En nuestro trabajo sobre la placa neural, hemos mostrado cómo la morfogénesis de una lámina de tejido es una consecuencia del comportamiento de sus células. Uno de estos tipos de comportamiento, a saber el realizar un programa de altura para cada célula, parece ser, a su vez, una consecuencia del comportamiento de las grandes moléculas estructurales, como los microtúbulos y los microfilamentos, dentro de cada célula. Según hemos visto, el programa de altura varía de una célula a otra. Esta observación crea algunas preguntas fundamentales. ¿Cuál es el mecanismo por el cual se establece el patrón espacial de los programas de altura? La contestación bien pudiera basarse en la formación de patrones en general. ¿Qué es exactamente lo que varía de una célula a otra para darles sus diferentes programas de altura? Quizás el mecanismo de regulación es como un termostato cuyo control molecular puede ajustarse de forma diferente en cada célula. Finalmente, necesitamos aprender cómo opera este mecanismo de control para realizar el programa de altura. Los mecanismos moleculares parecen estar al alcance de este tejido, de modo que podemos tener aquí una excelente oportunidad para abordar tales cuestiones.

La formación de la región supranotocordal de la placa neural y del propio notocordio siguen siendo un enigma. No se comprende cómo las células en esta parte de cada lámina pueden reorganizarse drástica, aunque coordinadamente, para dar lugar a estructuras alargadas. La respuesta puede estar en las interacciones de tensión superficial entre la región supranotocordal y el resto de la placa neural que operan a través de diferentes fuerzas de adhesión entre las células.

El desarrollo de un embrión es uno de los fenómenos más profundamente difíciles y un reto a la inteligencia. Después de varios años de estudio hemos tenido éxito al obtener una comprensión cuantitativa de cómo el comportamiento de las células en un tejido simple conduce a su cambio de forma. Aunque este trabajo ha aportado unos principios importantes de embriogénesis, ha revelado o hecho explícito cierto número de otros mecanismos fundamentales que quedan por dilucidar.

Teoría de complejidad

Centrales telefónicas, ordenadores y otros sistemas complejos están formados por un gran número de componentes simples. La teoría de complejidad se propone determinar el número de componentes necesarios para efectuar una tarea dada

Nicholas Pippenger

Muchos sistemas complejos, entre los que se cuentan los modernos ordenadores y las centrales telefónicas, se han construido interconectando un gran número de componentes simples. La complejidad de estos sistemas tiene su origen más en el número de componentes y en lo intrincado de sus interconexiones que en la propia complejidad de sus componentes. Los sistemas así formados son, en cierta medida, mucho mayores que la suma de sus partes.

Resulta natural suponer que cada componente de un sistema complejo se encuentra justificadamente en el lugar que ocupa, pero aunque pueda ser cierto que su supresión provoque un defectuoso funcionamiento del sistema, también puede ocurrir que con una reorganización general se obtenga un sistema operativo de mucho menor número de componentes. Por ejemplo, no existe en la actualidad ningún tipo de demostración que pruebe que las funciones realizadas por los computadores o las centrales telefónicas no puedan ejecutarse con idéntica eficiencia por sistemas formados por, pongamos por caso, la mitad de componentes. Esta posibilidad ha originado una nueva teoría matemática, llamada teoría de complejidad.

La teoría de complejidad persigue determinar el número mínimo de componentes necesarios para sistemas como los anteriores. Se busca alcanzar tal meta mediante dos procedimientos: hallando nuevos diseños que requieran menor número de componentes y demostrando que será necesario cuando menos cierto número de componentes, independientemente del diseño que pueda utilizarse. El descubrimiento de nuevos diseños de un sistema es problema de indudable interés práctico: puede aumentarse la eficiencia del sistema y reducir su costo. El segundo camino de investigación, que busca determinar límites que especifiquen cuándo resultará fútil todo intento de mejora del sistema, es igualmente necesario para conseguir la comprensión completa de un sistema determinado; frecuentemente, resulta la más difícil de llevar a buen término.

De las dos fuentes de complejidad, a saber, el número de componentes y su malla de interconexiones, la teoría de complejidad se ocupa, casi exclusivamente, de la primera. En ocasiones, este hecho es motivo de confusión, pues en su acepción habitual el término "complejidad" suele aplicarse más frecuentemente a la segunda. La distinción es importante, pues, por lo general, la disminución del número de componentes de un sistema conlleva una red de interconexiones más intrincada. En teoría de complejidad se considera que una transformación de esta naturaleza es ventajosa.

Con objeto de poner de manifiesto algunos de los principales temas de la teoría de complejidad me referiré exclusivamente a un problema particular: el diseño de una central telefónica eficiente. Durante muchos años, desde comienzos de siglo hasta mediados los años 50, las centrales telefónicas eran los sistemas digitales más complejos existentes. Su diseño ha recibido gran atención, tanto práctica como teórica.

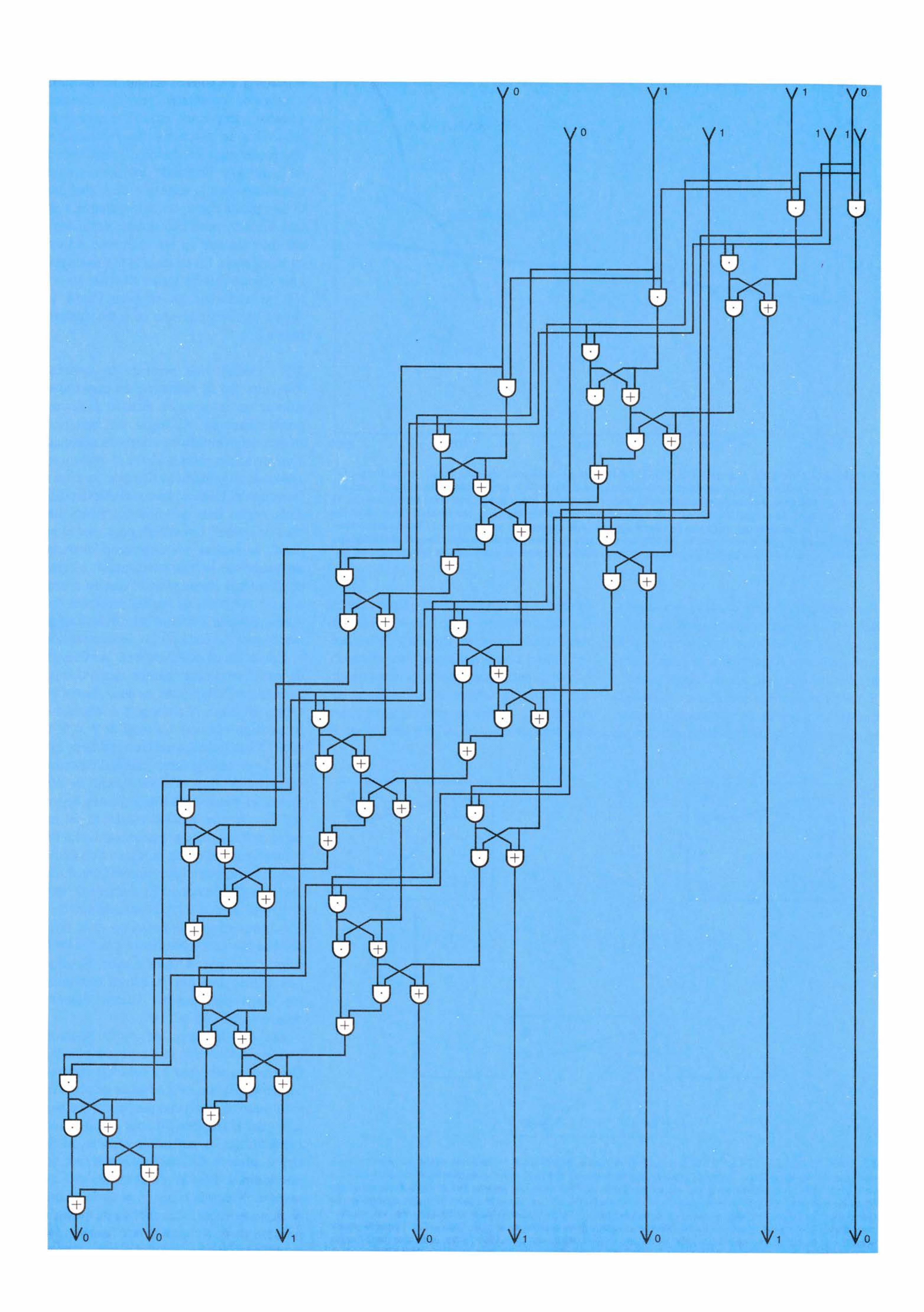
La razón de ser de una central telefónica consiste en proporcionar enlaces, o conexiones, para que sus abonados puedan entrar en comunicación. Como en un momento dado pueden estarse desarrollando muchas conferencias, la central ha de ser capaz de proveer muchos enlaces simultáneamente. Una central moderna no sólo está conectada con sus propios abonados, sino también a través de líneas especiales llamadas "líneas tronco" (trunks) o líneas principales, con otras centrales, que a su vez dan servicio a otros abonados. Una central de este tipo proporciona enlaces entre abonados y enlaces entre abonados y líneas tronco. (También puede que establezca enlaces entre líneas tronco, pero por lo general dicha tarea está encomendada a centrales especiales llamadas "centrales de peaje" [toll exchanges].)

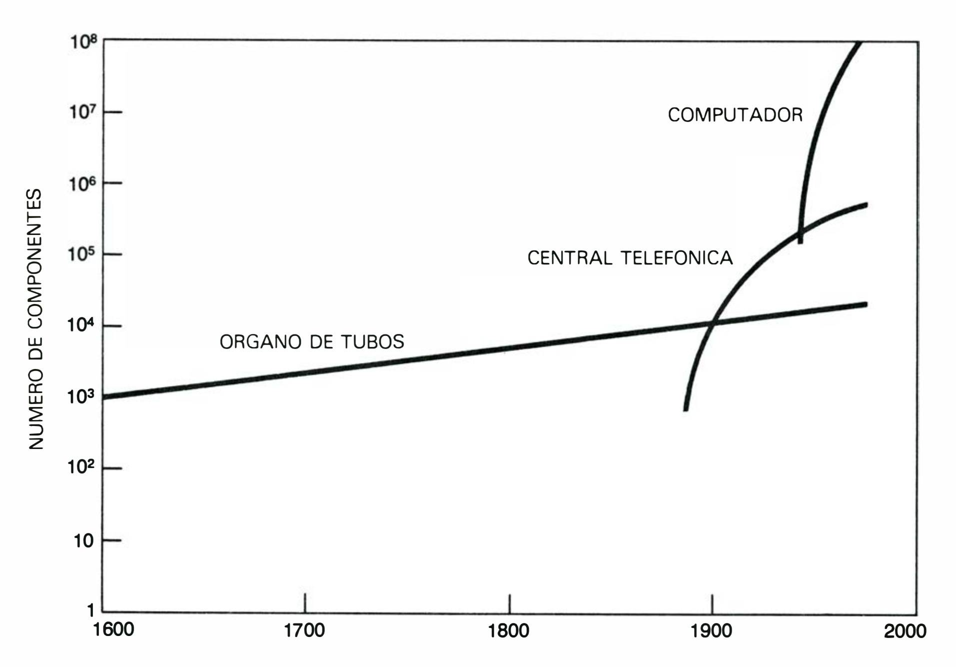
Para los propósitos de este artículo me limitaré a examinar solamente uno de los muchos sistemas de una central telefónica: una red de conmutación cuya única tarea consista en establecer vías para llamadas procedentes de líneas tronco, dirigidas a abonados dependientes de la central. La simplicidad de esta tarea la hace muy idónea para su análisis desde la teoría de complejidad.

Las redes de conmutación que ejecutan esta tarea en las modernas centrales telefónicas pueden considerarse compuestas por interconexiones de componentes de un único tipo fundamental: el interruptor. Se puede imaginar que un interruptor es una red de conmutación extraordinariamente sencilla, que da servicio a un único abonado y a una única línea principal; cuando el interruptor está cerrado se establece conexión entre la línea y el abonado, y cuando el interruptor se abre, la conexión se corta.

¿Cuántos componentes (interruptores) son precisos para construir el sistema (la red de conmutación)? La exposición de este problema que voy a presentar diferirá considerablemente de la que podría ofrecer un ingeniero de telecomunicación, de la misma forma que la versión del problema de diseñar una central térmica eficiente ofrecida por un físico diferiría de la presentada por un ingeniero industrial. Por mi parte, me fijaré sobre todo en las potencialidades y limitaciones intrínsecas al problema, sin prestar atención a los problemas que puedan presentarse en la práctica.

LOS SISTEMAS COMPLEJOS se construyen interconectando gran número de componentes simples. El sistema que muestra la ilustración permite efectuar el producto de números escritos en sistema binario. En este ejemplo las entradas reciben los factores 0110, o sea, 6, y 0111, que es igual a 7 *(arriba).* Su producto, 00101010, es decir, 42, aparece en las salidas *(abajo).* El sistema está formado por componentes de dos tipos. Los señalados con un punto son puertas "y", que entregan un 1 sólo cuando sus dos entradas reciben ambas simultáneamente un 1; los señalados con un signo "más" son puertas "0-exclusiva" que producen un 1 cuando una u otra (pero no ambas) entradas recibe un 1. Muchos computadores digitales multiplican números mediante un sistema semejante a éste, aunque construido a mayor escala. Se desconoce el número de componentes necesarios para multiplicar dos números de, por ejemplo, 48 dígitos binarios, incluso admitiendo un coeficiente dos o tres. La determinación del mínimo número de componentes en un sistema capaz de efectuar el producto de dos números es uno de los principales problemas de la teoría de complejidad.

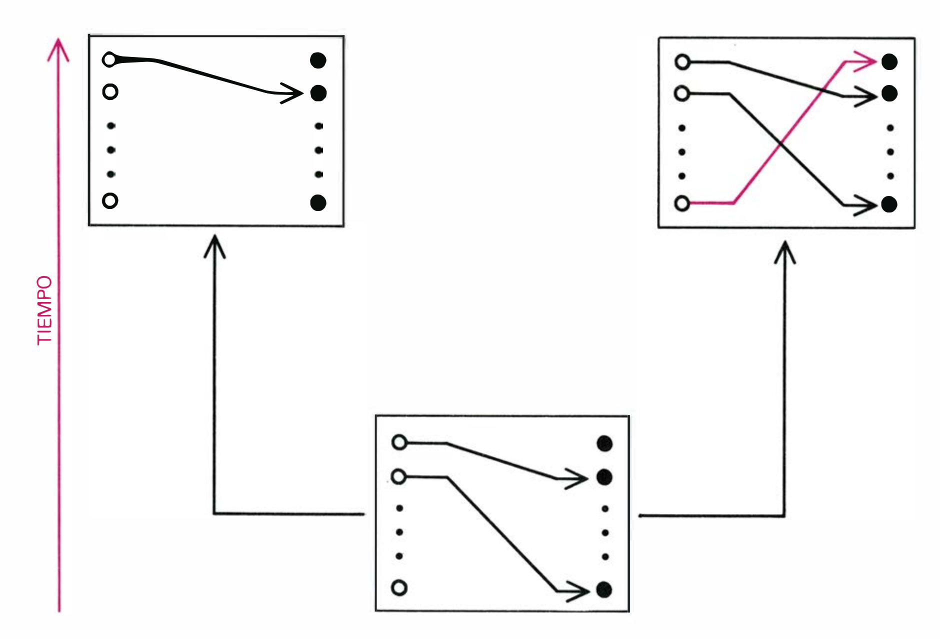

0
1
1
0
0
1
1
1
0
0
1
0
1
0
1
0



COMPARACION DEL GRADO DE COMPLEJIDAD de diferentes sistemas físicos; tiene frecuentemente carácter arbitrario, pues no existe un método universal de medir la complejidad. Sin embargo, durante los últimos 400 años, los sistemas complejos de mayor número de componentes han sido, sucesivamente, el órgano de tubos, la central telefónica y el computador. El gráfico indica el crecimiento del número de componentes de los sistemas; cada uno de ellos ha crecido más deprisa que su predecesor. Cuando los componentes disponibles para la construcción del sistema y la tarea que éste debe desempeñar quedan definidos con precisión, la teoría de complejidad busca determinar el mínimo número de componentes necesarios a tal fin.

Para una central térmica, las potencialidades y limitaciones intrínsecas están expresadas por las leyes de la termodinámica; para una central telefónica, por los descubrimientos de la teoría de complejidad.

Para comprender mejor el problema de diseñar una red de conmutación eficiente, imaginemos una central telefónica en un momento de funcionamiento típico. Se están desarrollando a su través cierto número de conferencias, cada una de las cuales implica una línea tronco y un abonado. La red de conmutación proporciona un enlace para cada una de estas conferencias, empleando distintos interruptores para cada una de ellas con el fin de que no se interfieran las conversaciones transmitidas a través de los enlaces. Hay dos acontecimientos que pueden modificar esta situación. Una de las partes que participan en una conferencia puede colgar, concluyendo la llamada y liberando los interruptores que establecían la conexión de la llamada. O bien puede llegar una nueva llamada por una línea tronco desocupada, destinada a un abonado que en ese momento no está comunicando. En tal caso la red ha de proveer enlace para la nueva llamada sin variar ni perturbar en ninguna forma las demás conferencias que se estén desarrollando.

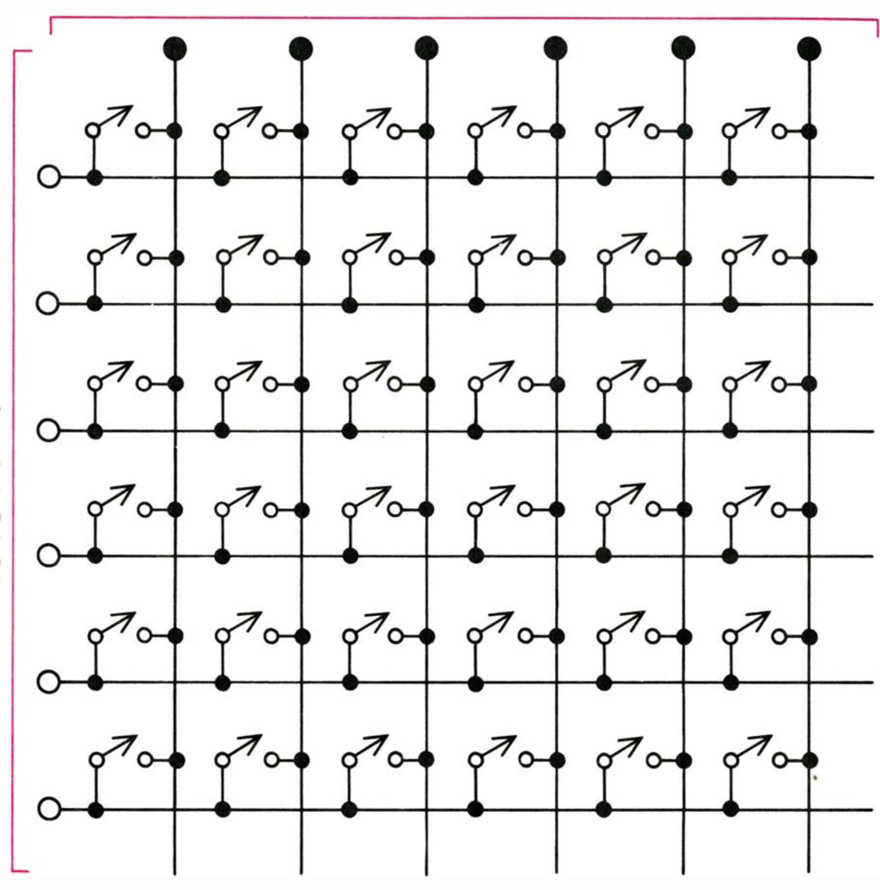


EN UNA CENTRAL TELEFONICA se reciben llamadas procedentes de distintas zonas *(círculos grandes en blanco)* **a través de líneas "tronco", que es preciso conectar con las líneas de los abonados** *(círculos grandes en negro)*. **Las vías de conexión se establecen mediante una red de conmutación, que es un sistema complejo formado por gran número de interruptores interconectados. En un momento dado se están desarrollando cierto número de conferencias a través de la central** *(abajo)*. **Al ir transcurriendo el tiempo, algunas concluyen, liberando los interruptores que establecían el enlace correspondiente** *(arriba, izquierda)*. **También puede ocurrir que se reciba una nueva llamada, destinada a un abonado con línea libre, a través de una línea tronco desocupada** *(arriba, derecha)*. **En tal caso la red debe proporcionar enlace para la nueva llamada** *(en color)*.

El método más evidente de construir una red de conmutación consiste en colocar un interruptor distinto para cada posible llamada. Al llegar por una línea tronco determinada una llamada destinada a un cierto abonado se cierra el interruptor adecuado; finalizada la llamada, se abre el interruptor. Una red de conmutación diseñada según este principio se llama una "red de cruces" (crossbar), pues, por lo general, se realiza prácticamente mediante un grupo de barras horizontales (correspondientes a líneas tronco) que se cruzan con un conjunto de barras verticales (correspondientes a abonados), situándose un interruptor en cada punto de intersección.

Con el fin de poder calibrar la eficiencia de este diseño supongamos una red capaz de manejar N llamadas, es decir, la red correspondiente a N troncos y N abonados. Se podrían efectuar un total de $N \times N$, es decir, N^2 distintas llamadas a través de esta red, y, por consiguiente, una red de cruces requerirá N^2 interruptores. Dicho de otra forma, el número de interruptores de una red de cruces es igual al cuadrado del número de llamadas que puede controlar. Por consiguiente, al crecer el número de llamadas, el número de interruptores crece mucho más rápidamente. El número de interruptores de una tal red capaz de atender a $2N$ comunicantes distintos no es el doble del número correspondiente a la red de N, sino 2^2, es decir, 4 veces mayor. Fenómenos de este tipo, que muestran crecimientos desproporcionados, suelen llamarse deseconomías de escala.

Las deseconomías de escala aparecen con frecuencia en la teoría de complejidad. Otro punto de vista en relación con esta deseconomía concreta consiste en observar el número de interruptores necesarios para construir la red, dividido por el número de llamadas que la red puede atender, es decir, el número de interruptores necesarios por llamada. Para la red de cruces este número es N^2 dividido por N, es decir, igual a N. Si no existiese deseconomía de escala, el número de interruptores por llamada permanecería siempre menor o igual que un



UNA RED DE CONMUTACION DE CRUCES contiene un interruptor individual para cada una de las posibles llamadas que pueda recibir la central. Cuando llega una llamada, destinada a un abonado con línea libre, a través de una línea tronco desocupada, se cierra el interruptor oportuno; cuando termina la conferencia, se abre este interruptor. En una red capaz de atender N llamadas (que tenga N líneas tronco y N abonados) pueden establecerse un total de $N \times N$, es decir, N^2 enlaces distintos, y, por ello, una red de este tipo contiene N^2 interruptores. Al aumentar el número de llamadas que la red debe controlar, el número de interruptores que contiene aumenta más rápidamente. Este fenómeno de crecimiento no proporcional se llama deseconomía de escala, y es característico de muchos sistemas estudiados en teoría de complejidad.

cierto número fijo, en lugar de ser función creciente del número de llamadas posibles.

Evidentemente, una red de conmutación verdadera es más complicada que la que acabo de describir. Por ejemplo, en una red verdadera el número de líneas tronco no es igual al número de abonados. (No obstante, estos dos números son aproximadamente proporcionales.) Además, juzgar el costo de una red solamente por el número de interruptores que utiliza es una grosera simplificación. Otros elementos contribuyen a fijar el costo total, como, por ejemplo, los hilos que conectan los interruptores, los chasis que los soportan, etcétera. Sin embargo, incluso teniendo en cuenta estos factores adicionales, la red de cruces seguiría mostrando deseconomía de escala. La deseconomía de escala es una propiedad intrínseca del diseño, y no sólo mera consecuencia de las hipótesis simplificadoras.

Podría sospecharse que un diseño que requiere N^2 interruptores para una red que solamente puede atender N llamadas a la vez no será el óptimo. Hay, efectivamente, un diseño superior, que permite conectar el mismo número de llamadas con menor número de interruptores. Tal diseño fue descubierto hacia 1950 por Charles Clos, de los Bell Laboratories.

El diseño de Clos se apoya en la idea de construir una gran red a partir de redes menores, llamadas subredes. Las subredes están organizadas en tres etapas, de forma que cada llamada ha de pasar por tres subredes. Las subredes realizan la misma tarea que la gran red (establecer conexiones entre las líneas de entrada y salida), pero a menor escala. Así pues, las subredes pueden ser de cruces. La mayoría son rectangulares en vez de cuadradas (es decir, tienen distinto número de líneas de entrada y salida) con el fin de que cada llamada posible disponga de un número suficientemente alto de posibles vías de paso a través de la red.

Con esta forma de diseño cada llamada puede seguir uno cualquiera de los varios caminos diferentes que atraviesan la red, siendo posible que caminos distintos compartan algunos interruptores. En la red de cruces, donde cada llamada sólo dispone de un camino no existe la posibilidad de compartir interruptores. Utilizando el diseño de Clos se puede construir una central que atienda N llamadas al mismo tiempo empleando aproximadamente $6N^{1,5}$ interruptores. Cuando N es mayor o igual que 36 este número de interruptores es siempre inferior a N^2.

Redimensionando la red todavía un poco más, es posible rebajar aún el número de interruptores: de $6N^{1,5}$ a $2^{2,5}N^{1,5}$ es decir, (5,656...) $N^{1,5}$. La reducción así obtenida del coeficiente multiplicativo 6 de la expresión que da el número de interruptores tiene, sin embargo, mucho menor importancia que la disminución del exponente de N, de 2 hasta 1,5. Pues es dicho exponente quien determina la razón de crecimiento del número de interruptores en función de N. La eficiencia del diseño de Clos se debe justamente a que rebaja tal exponente, frenando de forma muy importante la razón de crecimiento. Incluso si el coeficiente fuese mucho mayor que 6, la reducción del exponente de 2 a 1,5 garantizaría que para valores grandes de N el diseño de Clos requeriría mucho menor número de interruptores que la red de cruces.

Para destacar todavía más la superior importancia del exponente, es costumbre prescindir del coeficiente y considerar solamente el "orden" O del número de interruptores. Por ejemplo, la red de cruces exige $O(N^2)$ (léase "orden de N al cuadrado") interruptores. Dicho de otra forma, el número de interruptores de la red de cruces es, a lo sumo, un múltiplo constante de N^2. El método de construcción de Clos requiere $O(N^{1,5})$ interruptores.

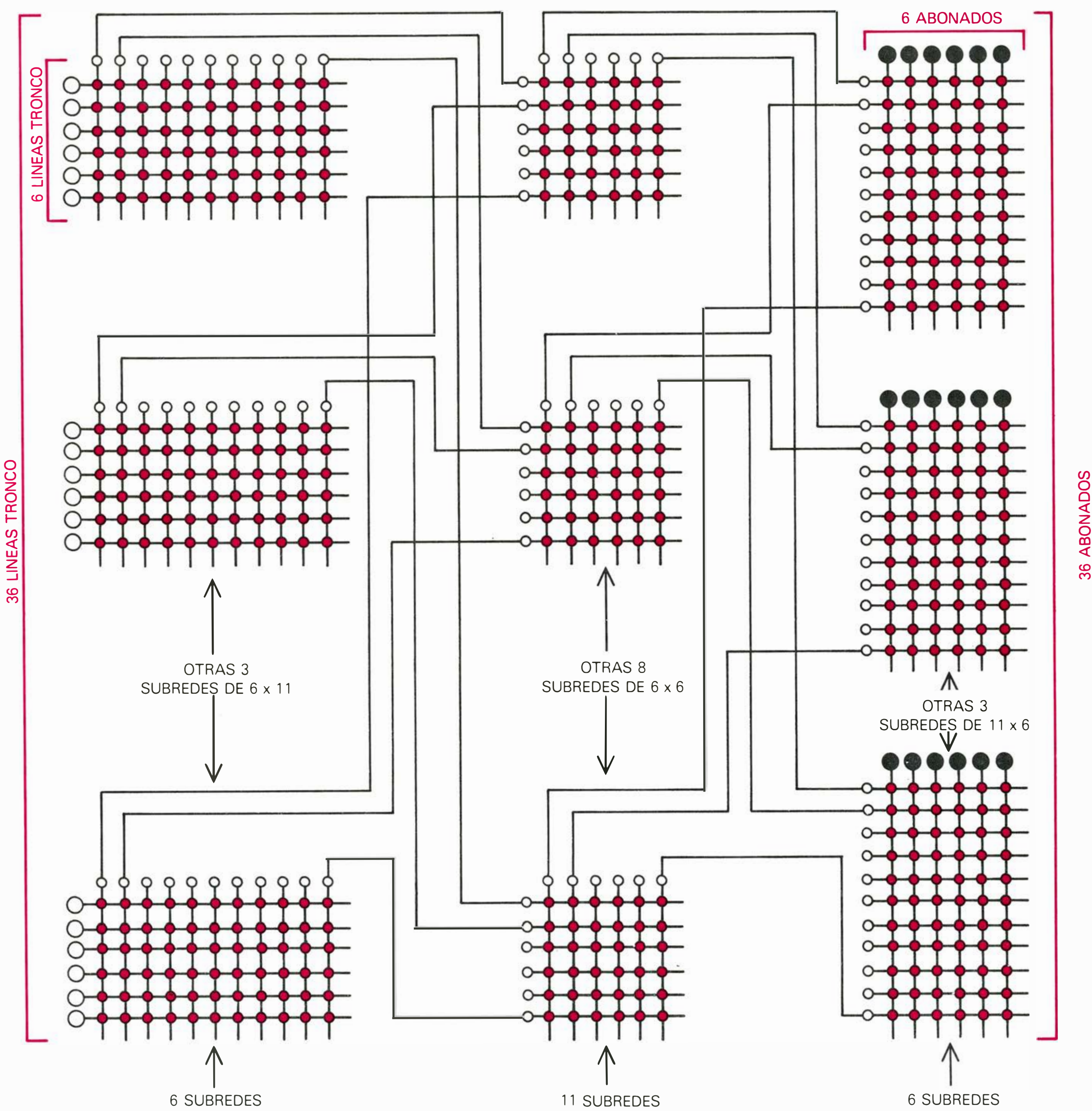
El número de interruptores de la red puede reducirse todavía más si se aplica reiteradamente el método de Clos a las subredes de la red, esto es, si se construyen las subredes no mediante redes de cruce sino interconectando subredes aún menores; estas subredes menores pueden todavía construirse por el método de Clos, y así sucesivamente. Evidentemente, para cada reiteración del método las subredes van siendo más pequeñas, hasta que eventualmente resulta más eficiente construir redes de cruce que seguir encajando subredes, con lo que el proceso concluye. La técnica de construcción de redes por descomposición en subredes más y más pequeñas se llama método de recurrencia, y es uno de los más aplicados en teoría de complejidad.

La versión perfeccionada del método de Clos fue analizada a comienzos de esta década por David G. Cantor, de la Universidad de California en Los Angeles. Según descubrió, utiliza $O(N (\log N)^{2,269...})$ interruptores. (El exponente 2,269... es solución de la ecuación $3^{1/(1-x)} + 2^{1/(1-x)} = 1$.). El logaritmo de N, incluso con un

exponente grande, crece más lentamente que N y aún que N elevado a un exponente pequeño; por tanto, esta expresión indica un ritmo de crecimiento más lento que $O(N^{1,5})$. (No es necesario especificar la base de los logaritmos utilizados, pues logaritmos de distinta base solamente difieren en un factor constante, suprimido en la notación "orden".)

Cantor descubrió incluso un diseño superior. Lo mismo que el de Clos, el diseño de Cantor se basa en interconectar subredes del tipo de cruces, pero ahora las subredes forman más de tres etapas y la malla de interconexiones es más intrincada. No es cosa fácil describir la malla de interconexiones. De hecho, el diseño de Cantor no comienza a ser ventajoso hasta que se utilizan redes de 11 o más etapas. La red resultante contiene $O(N(\log N)^2)$ interruptores. El ritmo de crecimiento es inferior al de $O(N(\log N)^{2.269...})$. Como ocurría antes, la mejora se debe a la reducción del exponente, esta vez, del que afecta a logaritmo de N.

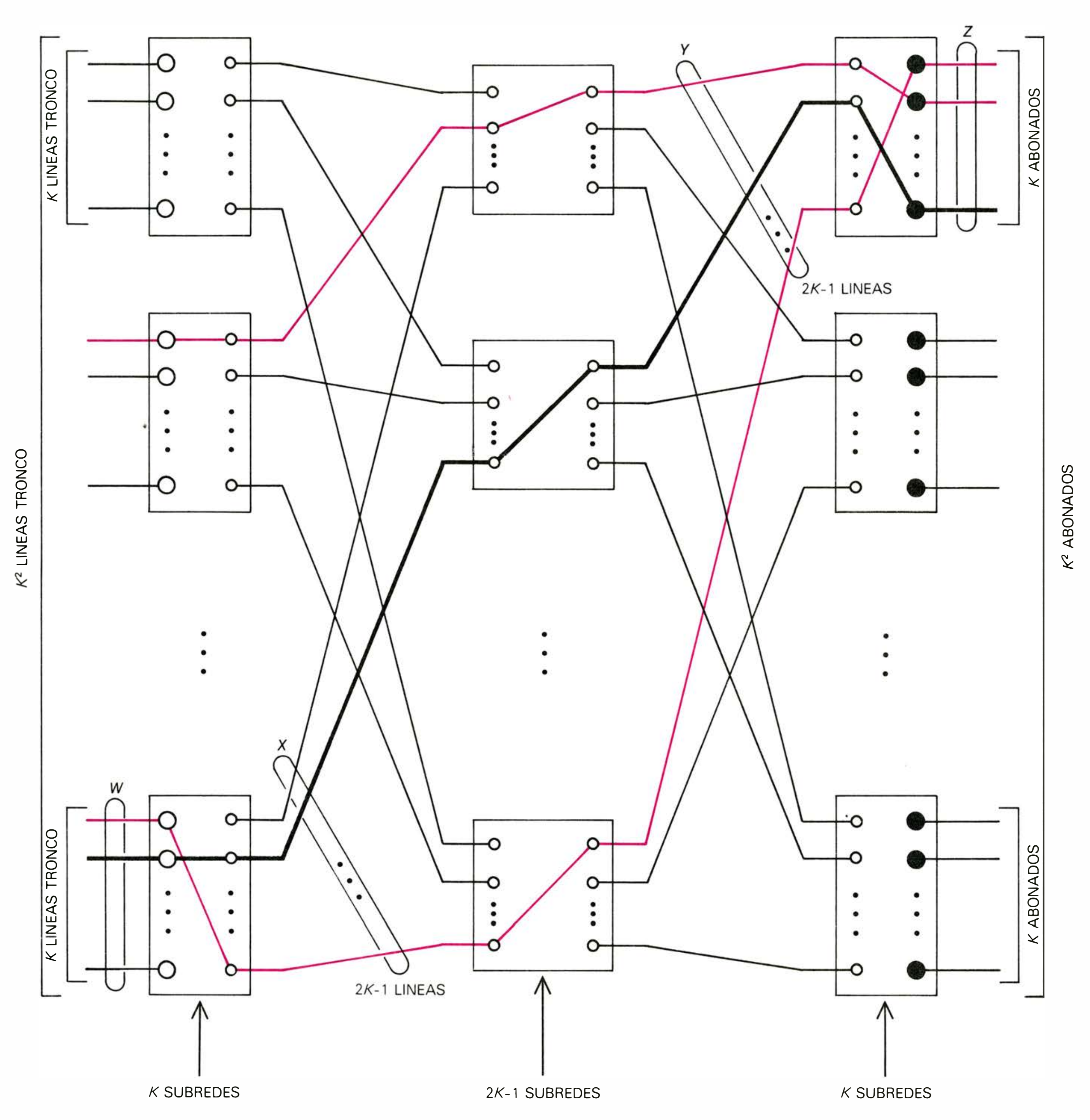
Los diseños de Clos y Cantor son más eficientes que la simple red de cruces, pero



UN METODO MAS EFICIENTE de diseñar redes de conmutación fue descubierto por Charles Clos, de los Bell Laboratories, hacia los años 50. Se puede formar una gran red de conmutación que utilice menos interruptores que la de cruces interconectando subredes de cruces más pequeñas. Muchas de estas subredes son rectangulares, y no cuadradas, es decir, tienen diferente número de líneas de entrada y salida. Las subredes se organizan en tres niveles, formando columnas, y cada subred se conecta a cada subred del nivel o niveles adyacentes. La ilustración muestra la construcción de una red para 36 líneas tronco y 36 abonados; los interruptores de cada subred se indican mediante puntos de color. (Se han omitido, para mayor claridad, la mayoría de las subredes y de las líneas de interconexión.) La superior eficiencia de este diseño se debe a que la red ofrece para cada llamada no un único camino, sino varios. Estos distintos caminos pueden compartir interruptores, y, por tanto, el número de interruptores de la red puede disminuirse sin provocar el bloqueo de llamadas *(véase la ilustración de la página opuesta).* **En una red de cruces hay solamente un camino para cada una de las posibles llamadas, y, por consiguiente, no hay posibilidad de compartir interruptores. Con la construcción que se muestra en la presente ilustración hay $6(6 \times 11) + 11(6 \times 6) + 6(11 \times 6)$, es decir, 1188 interruptores, en lugar de los 36×36, es decir, 1296 interruptores que son los correspondientes a una red de cruces de la misma capacidad. De hecho, en toda red de conmutación capaz de atender 36 o más llamadas el método ideado por el estadounidense Clos requiere menor número de interruptores que la red de cruces.**

lo mismo que ésta, muestran también deseconomías de escala. ¿Existe algún diseño que no exhiba esta propiedad? Hasta este momento he discutido métodos concretos de diseñar y construir redes, mas para poder responder a la cuestión anterior es preciso examinar en general los métodos de construcción, esto es, aplicar un razonamiento que sea válido para cualquier método de construcción de redes, por muy complicado o ingenioso que pudiera ser. En 1950, Claude E. Shannon, de los Bell Laboratories, imaginó un razonamiento de este tipo, que demuestra que ningún método de construcción de redes de conmutación podrá estar exento de deseconomías de escala.

El concepto clave en el razonamiento de Shannon es la noción de estado de una red, a saber, la configuración de interruptores abiertos y cerrados que forma la red en un momento determinado. El estado de la red va evolucionando conforme llegan o terminan llamadas, de forma muy parecida a como evoluciona el estado de un sistema físico en respuesta a perturbaciones externas, como, por ejemplo, el calentamiento o



EL METODO DE CLOS crea $2K$-1 enlaces diferentes entre cada línea tronco y cada abonado, permitiendo obtener una red capaz de atender K^2 llamadas con, aproximadamente, $6K^3$ interruptores. Se muestra aquí el diseño de Clos para una red de tamaño arbitrario con tres etapas o niveles. Está formada por dos etapas exteriores, compuesta cada una de ellas por K subredes, y una etapa central, compuesta por $2K$-1 subredes. Si se toma K igual a aproximadamente $N^{0,5}$, la red puede atender alrededor de N llamadas empleando unos $6N^{1,5}$ interruptores. (Por ejemplo, en la figura de la página opuesta K es igual a 6 y N es igual a K^2, o sea, 36.) Cuando N sea mayor o igual que 36, el número de interruptores permanece siempre inferior a N^2, que sería el número de interruptores preciso en una red de cruces de igual capacidad. Para comprobar que la reducción del número de interruptores no origina posibilidad de llamadas bloqueadas, supongamos que llegue una llamada por una de las líneas tronco del grupo *W*, dirigida a un abonado del grupo *Z*. Hay solamente otras K-1 líneas tronco en el grupo *W*, y, por tanto, no podrá haber más de K-1 líneas del grupo *X* ocupadas en este momento *(color)*. Análogamente, no pueden tampoco estar ocupadas más de K-1 líneas del grupo *Y (en color)*. Por consiguiente, las líneas ocupadas de los grupos *X* e *Y* están conectadas, a lo sumo, con K-1 más K-1, esto es, $2K$-2, subredes del grupo central. Como en la etapa central hay $2K$-1 subredes, siempre existirán en la etapa central 2 K-1 menos $2K$-2, subredes para las que está desocupada la línea de *X* y la línea de *Y*. El camino que atraviesa esta subred *(línea gruesa)* se puede asignar a la nueva llamada, sin quedar ésta bloqueada.

la compresión. Shannon demostró que las deseconomías de escala son inevitables, determinando para ello cotas superior e inferior del número de posibles estados que puede adoptar una red.

El primer paso de la demostración consiste en probar que una red capaz de atender N llamadas ha de poder adoptar al menos $N!$, esto es, $N \times (N-1) \times ... \times 1$, estados distintos. Imaginemos la red en un momento en que no se está desarrollando ninguna conversación. Una llamada que llegase por la primera línea tronco podría conectarse a cualquiera de los N abonados. Una llamada que llegase antes de que la primera hubiese terminado podría conectarse a cualquiera de los $N-1$ abonados restantes. Supongamos que el proceso continúa hasta que llega una llamada por la última línea tronco y ésta es enlazada con el último abonado. El número de posibles sucesiones de destinos de las N llamadas es $N \times (N-1) \times ... \times 1$. A cada una de estas sucesiones le corresponde un conjunto distinto de conferencias desarrolladas a través de la central, por lo que la red habrá de adoptar un estado distinto. Hay así pues $N!$ distintos estados a los que puede ser llevada la red. (En realidad, solamente se han contado los estados correspondientes al desarrollo de N conferencias. El número total de posibles estados será mayor que $N!$.)

El segundo paso de la demostración consiste en probar que una red de S interruptores no puede adoptar más de 2^S estados. Como cada interruptor, por sí solo, puede ser considerado como una minúscula subred que tiene exactamente dos estados (abierto y cerrado), una red de S interruptores puede a lo sumo adoptar $2 \times 2 \times ... \times 2 = 2^S$ estados. (En general, la red tendrá todavía menos de 2^S estados, porque muchas combinaciones de interruptores abiertos y cerrados son absurdas, es decir, habrá combinaciones que no formarán caminos sin interferencias.)

La conclusión ya se encuentra al alcance de la mano. Una red capaz de atender N llamadas utilizando S interruptores no podrá tener menos de $N!$ estados diferentes ni tampoco más de 2^S estados, y, por consiguiente, el número de interruptores S habrá de cumplir que $2^S \geq N!$. Tomando logaritmos de base 2 en cada miembro de la desigualdad se respeta su sentido, y así pues, $2^S \geq N!$ implica que $S \geq \log_2 N!$.

En los albores del cálculo diferencial, Abraham de Moivre y James Stirling estudiaron el logaritmo de $N!$, descubriendo que $\log_2 N!$ toma siempre valores cercanos a $N \log_2 N$, y que la aproximación es tanto mejor cuanto mayor es N. Así pues, el número de interruptores de la red debe ser, cuando menos, del orden de $N \log_2 N$, y el número de interruptores por llamada, de aproximadamente $\log_2$ cuando menos, que es el resultado de dividir $N \log_2 N$ entre N. Dicho de otra forma, el número de interruptores necesarios para construir cualquier red de conmutación es función creciente del número de llamadas que la central pueda atender, hecho que revela que la deseconomía de escala es característica intrínseca de las redes de conmutación: ningún método de construcción, por ingenioso que sea, podrá evitarla.

Las investigaciones que aquí he descrito siguen un esquema típico del trabajo en teoría de complejidad: por una parte se inventan sistemas de construcción encaminados a rebajar los componentes de un sistema, y, por otra, se elaboran razonamientos dirigidos a establecer acotaciones de la amplitud de dicha reducción. En el caso de redes de conmutación sigue existiendo una laguna entre las construcciones efectivas y las acotaciones. El método de construcción de Cantor requiere $O(N (\log N)^2)$ interruptores. El razonamiento de Shannon muestra que es imposible evitar toda deseconomía de escala; así pues, será imposible encontrar un método de construcción que precise sólo $O(N)$ interruptores. Pero, ¿podrá construirse una red con $O(N \log N)$ interruptores?

Tal cuestión ha sido afirmativamente resuelta por L. A. Bassalygo y M. S. Pinsker, del Instituto de Problemas de Transmisión de la Información, de Moscú. Lo más notable de sus hallazgos estriba en lo que se apartan del esquema de trabajo que acabo de exponer. Bassalygo y Pinsker demostraron que, en efecto, puede construirse una central que atienda N llamadas con $O(N \log N)$ interruptores, pero lo demostraron sin dar un método de diseño.

$6N^{1,5}$ METODO DE CONSTRUCCION DE CLOS
RED DE CRUCES DE N^2
NUMERO DE INTERRUPTORES
NUMERO DE LLAMADAS (N)
1, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5

DEPENDENCIA ENTRE EL NUMERO DE INTERRUPTORES de una red y el número de llamadas que ésta puede atender, para dos métodos de construcción diferentes. Tanto el número de llamadas (N) como el de interruptores se han representado en escalas logarítmicas. Toda función de la forma cN^{α}, donde c y α son constantes, se representa gráficamente mediante una línea recta respecto de unos ejes así graduados. El coeficiente c determina el punto de intersección de la recta con el eje vertical, y el exponente α, la pendiente de la recta. (En este ejemplo, la pendiente de la recta viene dada por la razón de crecimiento del número de interruptores.) Para todo par de funciones de este tipo hay un valor de N a partir del cual la función de menor exponente toma valores más pequeños que la otra. El método de Clos es superior al de red de cruces.

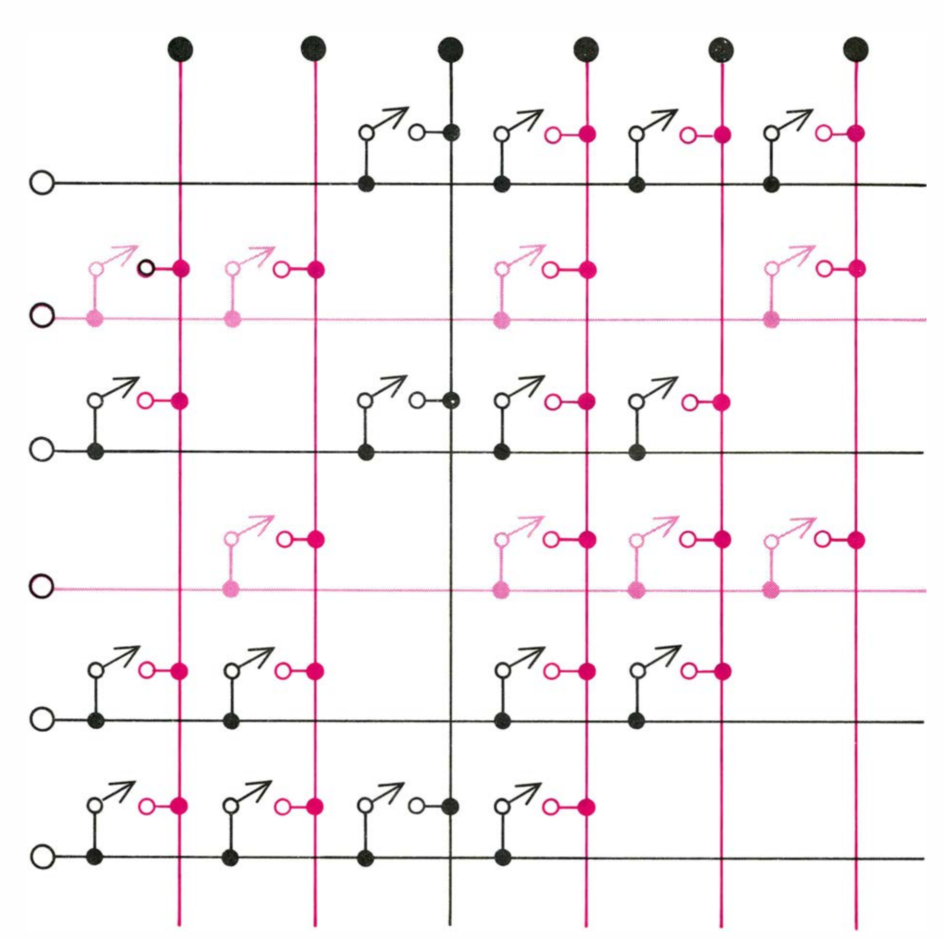
Las redes descritas por Bassalygo y Pinsker se construyen interconectando subredes especiales que denominaré redes de cruces dispersos. Una red dispersa es una red de cruces a la que se ha desprovisto de muchos interruptores, pero que todavía cumple el siguiente requisito: todo grupo que contenga más de un tercio de las barras horizontales está conectado mediante interruptores a más de dos tercios de las barras verticales.

Como es evidente, una red de cruces ordinaria (en la que toda barra horizontal está conectada a toda barra vertical) satisface también este requisito; pero una red dispersa lo cumple con un número muy inferior de interruptores. Imaginemos una subred de K por K, es decir, una subred en la que haya K líneas de entrada y K líneas de salida de la red. Una red de cruces de este tamaño exigiría K^2 interruptores, mientras que una red dispersa de igual tamaño puede construirse con sólo $12K$ interruptores. Una vez disponibles las redes dispersas, éstas pueden interconectarse (de forma muy semejante a las redes de cruces ordinarias por los métodos de Clos y Cantor) y construirse con ellas redes que sean capaces de manejar N llamadas empleando $O(N \log N)$ interruptores.

La parte más llamativa de la demostración de Bassalygo y Pinsker es la referente a la posibilidad de construir redes dispersas de K por K utilizando $12K$ interruptores. En lugar de referirse a una disposición concreta de los interruptores, en esta parte de la demostración Bassalygo y Pinsker examinaron la clase de todas las posibles disposiciones de $12K$ interruptores. Cada una de estas configuraciones, o bien es aceptable (forma una red de cruces dispersa) o bien es inaceptable (no la forma). Se pueden ahora aplicar técnicas conocidas de análisis combinatorio con el fin de obtener recuentos del número total de configuraciones y una cota superior del número de configuraciones inaceptables.

Esta cota superior resulta ser inferior al número total de posibles disposiciones de los interruptores. (En realidad, solamente una pequeña fracción del total de configuraciones son inaceptables.) Por consiguiente, debe existir algún esquema aceptable, es decir, que forme una red dispersa. (De hecho, la inmensa mayoría de los esquemas son aceptables.) Por consiguiente, es posible construir una red dispersa de K por K con $12K$ interruptores, para todo valor de K. (Y estas redes dispersas pueden interconectarse y formar entonces una red de $O(N \log N)$ interruptores.)

¿En qué sentido puede entonces decirse que este razonamiento no proporciona un método explícito de diseño y construcción de redes de cruces dispersos? Después de todo, un conjunto de $12K$ interruptores solamente puede disponerse de un número



RED DE CRUCES DISPERSOS es una red de cruces en la que se han eliminado muchos interruptores, aunque sigue cumpliendo todavía la condición de que todo grupo formado por una tercera parte de las barras horizontales ha de estar conectada mediante interruptores con más de dos terceras partes de las barras verticales. Por ejemplo, en la pequeña red dispersa que muestra la figura, un grupo de dos barras horizontales *(en color claro)* **está conectado con cinco barras verticales** *(color obscuro).* **L.A. Bassalygo y M. S. Pinsker, del Instituto de Problemas de Transmisión de la Información, de Moscú, demostraron que interconectando redes dispersas pueden construirse redes de conmutación de no más de $cN \log N$ interruptores, siendo c una constante. Su demostración es atípica en teoría de complejidad; en efecto, llega a establecer la existencia de una tal red pero no aporta explícitamente el método que sirve para proyectarla.**

finito de maneras en K barras horizontales y K barras verticales. ¿No sería suficiente enseñar cada una de estas disposiciones –comprobando todos los grupos formados por un tercio de las barras horizontales y viendo si están conectados a más de dos tercios de las verticales– hasta descubrir una red dispersa? Sin embargo, tan pronto se calcula el número de posibles configuraciones de los interruptores, resulta obvio que tal procedimiento no es aplicable.

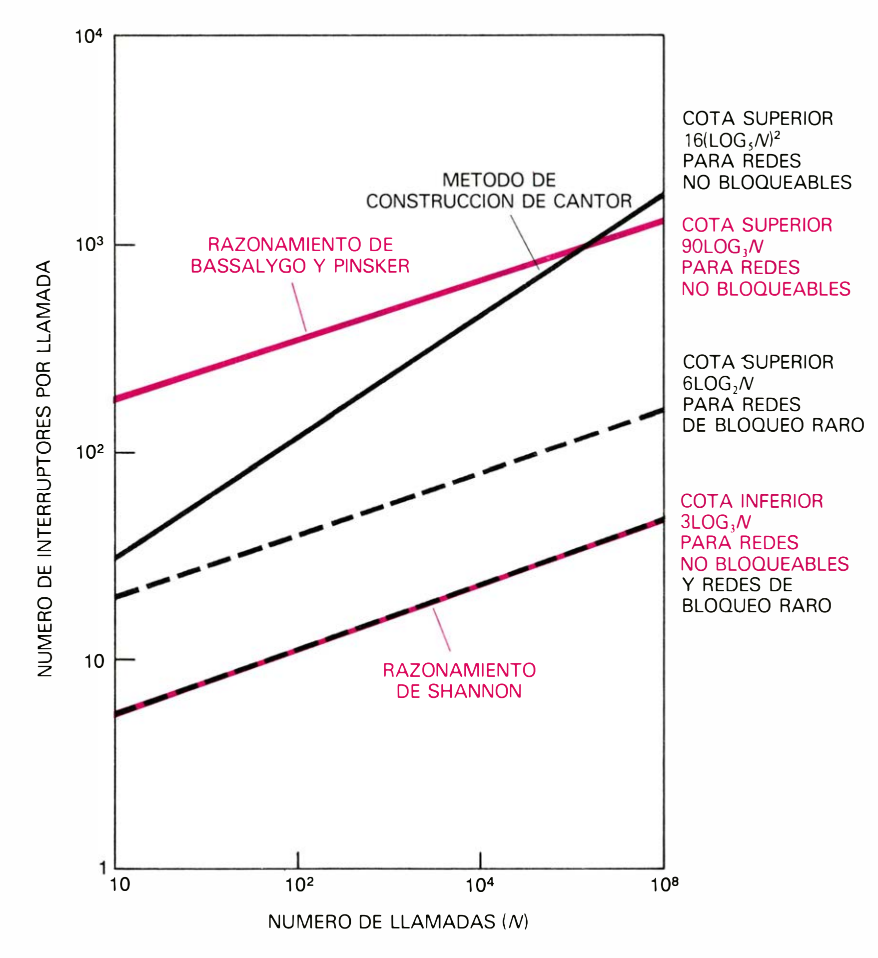
Por ejemplo, si K es igual a 48, hay más de 10^{514} disposiciones diferentes. Incluso si pudieran ensayarse un millón de configuraciones por segundo, harían falta más de 10^{500} años para ensayarlas todas. De todas maneras, como la inmensa mayoría de las configuraciones son aceptables, con ensayar una o dos sería suficiente. Ni aún así. Pues para demostrar que una configuración define efectivamente una red de cruces dispersa hay que comprobar tantas condiciones que incluso el ensayo de una sola configuración consumiría una ingente cantidad de tiempo. Para la red de 48 por 48 barras hay más de 10^{24} formas de seleccionar la tercera parte de las barras horizontales y dos terceras partes de las verticales. Aunque pudieran ensayarse un millón de casos por segundo, harían falta más de 10^{10} años para verificarlos todos.

Los razonamientos de Shannon y de Bassalygo y Pinsker muestran que, al aumentar el número de llamadas atendidas por una central, el número de interruptores crece con la rapidez del logaritmo del número de llamadas, y no tiene por qué crecer más rápidamente. Sin embargo, no se conoce ningún diseño concreto de redes que alcancen esta mínima razón de crecimiento. Además, las mejores cotas superior e inferior disponibles para el número de interruptores por llamada necesarios en una red tienen el mismo orden, o razón de crecimiento, pero sus coeficientes difieren en un factor 30. Todavía se ignora en qué gama de valores se encuentra el valor exacto del coeficiente.

Todos los pertinaces problemas anteriores pueden evitarse exigiendo un poco menos de las redes de conmutación. Hasta el momento solamente he examinado redes

sin bloqueo: redes que proporcionan un enlace para toda llamada que llegue por una línea libre y esté destinada a un abonado libre. Hay redes de conmutación de un tipo diferente que también pueden utilizarse en una central telefónica: redes de bloqueo raro, que dan conexión a la mayoría de las llamadas que se produzcan en un momento dado, pero quizá no a todas ellas. Una red sin bloqueo garantiza vías de enlace incluso para una sucesión de llamadas elegidas por un adversario de la red (un adversario es alguien que se propone obligar a la red a bloquear una llamada). Una red de bloqueo raro solamente garantiza conexión para la mayoría de las llamadas en un ambiente benigno: llamadas que llegan aleatoriamente. (Los procesos que gobiernan la llegada de llamadas son tan complicados que resulta más fecundo examinarlos probabilística que determinísticamente; desde esta perspectiva, aunque el flujo y reflujo de las llamadas sigan ciclos predictibles, la llegada pormenorizada de llamadas individuales puede considerarse como fenómeno aleatorio.

En una central telefónica real no es necesario garantizar una conexión para toda llamada en todos los estados posibles de la red de conmutación. Probablemente, los usuarios de una central no se quejen si, de cada mil llamadas, una resulta bloqueada, y todavía menos si de esta forma se obtiene una reducción importante en el



ACOTACIONES SUPERIOR E INFERIOR del número de interruptores por llamada necesarios para construir una red de conmutación (número de interruptores de la red dividido por el número de llamadas que la red puede atender). Tales acotaciones se han establecido mediante diversos razonamientos. Al representar gráficamente dichas cotas en unos ejes cuya graduación para el número de interruptores por llamada sea logarítmica, y cuya escala de llamadas sea doblemente logarítmica (un desplazamiento unitario a lo largo del eje corresponde a elevar al cuadrado, en lugar de multiplicar por 10) las cotas en cuestión tienden asintóticamente hacia las rectas que aquí se muestran. (En el presente, las centrales telefónicas reales manejan de 10^3 a 10^4 llamadas. Las gráficas se han prolongado mucho más allá de 10^4 llamadas, para mostrar la intersección de las cotas superiores.) Las cotas superiores, establecidas por David G. Cantor, de la Universidad de California en Los Angeles y Bassalygo y Pinsker, y la acotación inferior, establecida por Claude E. Shannon en los Bell Laboratories *(líneas continuas)* son válidas para redes sin bloqueo, es decir, para redes que garantizan la existencia de enlace para toda llamada procedente de una línea tronco desocupada dirigida a un abonado libre. Las otras acotaciones *(línea de trazos)* se refieren a redes de bloqueo raro, redes que solamente garantizan enlaces para la mayoría de las llamadas, originadas al azar. Las cotas superior e inferior del número de interruptores por llamada precisos para las redes de bloqueo raro se encuentran por debajo de las correspondientes a redes sin bloqueo. La diferencia de las cotas inferiores correspondientes a uno y otro tipo es despreciable cuando la probabilidad de bloqueo (la fracción del total de llamadas que la red no puede enlazar) es pequeña. Según parece, las redes de bloqueo raro son más sencillas y de construcción más económica que las no bloqueables. Para elucidar si efectivamente ocurre o no así, será necesario demostrar que la cota inferior correspondiente a las centrales no bloqueables es estrictamente mayor que la correspondiente a las de bloqueo raro, o bien, al contrario, demostrar que la cota superior para las centrales no bloqueables puede ser igual a la cota inferior de las redes de bloqueo raro. No se sabe cuál de estas alternativas prevalecerá.

costo. Por aplicación de este hecho las centrales telefónicas reales consiguen utilizar menos interruptores que cualquiera de las redes no bloqueables que antes describí, proporcionando resultados satisfactorios a bajo coste.

Las redes de bloqueo raro presentan nuevos problemas, que se suman a los anteriores, en teoría de complejidad. ¿De qué forma deberían construirse? ¿Tienen también deseconomías de escala inevitables? Mientras era estudiante de segundo ciclo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts descubrí que para todo número positivo ε (pongamos, por ejemplo, una milésima) existe una red que posee la siguiente propiedad: Si la red se encuentra en un estado elegido arbitrariamente y llega por una línea tronco libre una llamada destinada a un abonado libre, entonces la probabilidad de que no pueda encontrarse vía de enlace entre ambos será, a lo sumo, igual a ε.

Lo mismo que las redes de Bassalygo y Pinsker, estas redes de bloqueo raro contienen $O(N\log N)$ interruptores. Además para tales redes, el coeficiente multiplicador eliminado por la notación "orden" es menor que el dado por Bassalygo y Pinsker en un factor de aproximadamente 10 *(véase la ilustración de la página anterior)*. Finalmente, existe un plan explícito de construcción de estas redes, por lo que el principal problema de las redes sin bloqueo ha sido eliminado. Una dificultad subsiste. La propiedad que expresa la probabilidad de que una llamada quede bloqueada en una central de bloqueo raro nada afirma respecto de la evolución del estado de la red con el tiempo, y se ignora todavía si es posible o no que una red en un estado aleatoriamente elegido llegará a estar en otro estado también aleatoriamente elegido, tras la llegada y terminación de muchas llamadas. Por consiguiente, todavía no comprendemos del todo por qué las centrales telefónicas son tan eficientes como son...

Existe diversidad de modos de generalizar el razonamiento de Shannon en relación con la deseconomía de escala de las centrales sin bloqueo a las centrales de bloqueo raro. Todos ellos muestran que las redes de bloqueo raro tienen una deseconomía de escala del mismo tipo que las centrales no bloqueables: el número de interruptores por llamada ha de crecer con la misma rapidez que el logaritmo del número de llamadas. Por consiguiente, la introducción de una probabilidad de bloqueo fija no podrá afectar sino al coeficiente de la expresión del número de interruptores.

Parece ser que las centrales de bloqueo raro son más fáciles y más baratas de construir que las no bloqueables, aunque todavía cabe la posibilidad de que se encuentre un método de construcción de estas últimas que utilice tan pocos interruptores como las otras. Evidentemente, si por el mismo costo pudieran tenerse redes de uno y otro tipo (con igual número de componentes), no habría razón para preferir las de bloqueo raro, no importa cuán insólito sea este fenómeno. No obstante, se ignora si los costos de estas dos clases de red son verdaderamente iguales. Pues al menos para un problema, el de transmisión de información por un canal ruidoso, de empeñarse en obtener el tipo de transmisión perfecta análogo al no bloqueo de las redes de conmutación requiere un costo extra, que se manifiesta en forma de reducción del ritmo de transmisión.

Existen dos métodos de mostrar si ocurre o no lo mismo en las redes de conmutación. Si la cota inferior del costo de las centrales sin posible bloqueo se elevase por encima de la cota superior del costo de las centrales de bloqueo raro, se habría demostrado que librar de bloqueos al servicio telefónico exige recargar los costos. O bien, podría ocurrir que llegara a reducirse la cota superior de las centrales no bloqueables hasta la cota inferior de las centrales de bloqueo raro, con lo que se probaría que el servicio sin bloqueos no implica sobreprecios. Sea cual sea el caso, se requiere una comprensión más profunda de las centrales no bloqueables.

¿Cuál es entonces el valor de los trabajos realizados sobre redes de conmutación? Desde el punto de vista de las aplicaciones de carácter práctico, la teoría es francamente satisfactoria. Se han utilizado versiones ampliadas de esta teoría —versiones que toman en consideración otros componentes además de interruptores, fluctuaciones del tráfico de llamadas, etcétera— con el fin de diseñar redes de conmutación reales. La teoría de redes no bloqueables se encuentra también en prometedor estado, a un tiempo tentador y exasperante. Parece que para realizar nuevos avances en esta teoría serán precisos razonamientos de tipo radicalmente nuevo, fundamentados en nuevas formas de entender el problema.

He examinado en este artículo un único problema de teoría de complejidad, pero los fenómenos que revela se presentan con frecuencia en otros problemas. De hecho, la más importante lección a extraer de la teoría de complejidad está en la diversidad de fenómenos que pueden surgir de la interacción de componentes simples. Hoy en día, tanto los computadores como las centrales telefónicas suscitan problemas que rebasan nuestra capacidad de comprensión. Y estos sistemas son minúsculos frente a la complejidad del más humilde sistema biológico. Mientras la teoría de complejidad se debate hoy por hoy con los problemas a su alcance, otros enormemente mayores esperan más allá.

La protección de la piedra

Las fuerzas que erosionan la piedra en la naturaleza también la erosionan cuando se usa en edificaciones; su acción se intensifica por la presencia de contaminantes en el aire. La desintegración puede retardarse con nuevos tratamientos químicos

K. Lal Gauri

La piedra es tradicionalmente el más persistente de los materiales de construcción, pero su duración no es absoluta. Esta depende del tipo de piedra y de su medio ambiente, especialmente cuando éste es urbano y rico en óxidos de azufre y nitrógeno y dióxido de carbono. Bajo estas condiciones, la piedra se deteriora, algunas veces con bastante rapidez. Paradójicamente, dicho proceso se ha visto acelerado en algunos casos por intentos que se hicieron en el pasado de salvar estructuras que se estaban deteriorando. Sin una acción correctiva adecuada bien podría ser que espléndidas edificaciones, tales como el Partenón, el Coliseo y el Taj Mahal, que se encuentran ya en distintas fases de deterioro, acaben desintegrándose.

En varios laboratorios, de los cuatro punto cardinales, se están realizando estudios con el objeto de encontrar métodos satisfactorios de protección de la piedra. Uno de ellos es el laboratorio de conservación de la piedra de la Universidad de Louisville, en donde yo, como geólogo, y otros investigadores de diversas disciplinas hemos unido nuestros esfuerzos para tratar de resolver el problema. Este artículo se basa en nuestro propio trabajo.

El deterioro de la piedra se pone especialmente de manifiesto en las fachadas sucias, detrás de las cuales la piedra se desmorona materialmente. Este proceso hace la piedra poco atractiva y puede convertir al edificio en estructuralmente defectuoso. La finalidad de la conservación es hacer reversibles los procesos de deterioro de modo que la fachada quede limpia y la piedra estructuralmente regenerada.

Otro aspecto de la conservación concierne a la restauración de partes de una estructura de piedra que se hayan deteriorado irremediablemente. Consideraciones relativas a la ingeniería estructural pueden requerir el reemplazamiento de partes inestables de un edificio histórico, al tiempo que se mantiene la integridad arquitectónica del conjunto. Requerimientos análogos se presentan en las zonas sísmicas de California, en donde las ordenanzas arquitectónicas exigen la supresión de ciertos tipos de cornisas voladizas en interés de la seguridad. La reposición se hace mediante materiales artificiales más ligeros que mantengan la calidad estética y estructural del original.

La conservación de la piedra es, por tanto, un tema con muchas facetas. Se ocupa de los procesos de meteorización; de la limpieza, consolidación y restauración de objetos meteorizados; de la fabricación de estructuras de reemplazamiento y del desarrollo de los criterios que sirven de pauta para el trabajo de conservación.

Las piedras naturales más comúnmente utilizadas en construcción son el mármol, la caliza, la arenisca, el basalto y el granito. La serpentinita y el "verde antiguo", denominadas equivocadamente mármol, se emplean a veces como sillares y columnas. Las calizas y los mármoles están constituidos esencialmente por calcita; otras piedras de edificación están formadas por silicatos, pero también pueden contener calcita (los granos de cuarzo en una arenisca pueden estar cementados por ella). El "verde antiguo", un material silicatado, está atravesado siempre por venas de calcita.

Todos estos minerales son atacados (con distinta velocidad) por el dióxido de carbono disuelto en agua. La omnipresente calcita muestra la máxima reactividad. Un impresionante ejemplo de esta reactividad lo constituye la Cueva del Mamut en Kentucky, que comprende un enorme sistema de cavidades formadas por lixiviación de una caliza paleozoica durante millones de años.

La solución de dióxido de carbono y agua reacciona con la calcita para formar productos solubles que se incorporan a la solución. En una arenisca en la que los granos estén cementados por calcita, tal lixiviación reduce el índice abrasivo de la roca (una medida del grado en que el material resiste a la abrasión) y con el tiempo causa la disociación de los granos. De un modo similar, en calizas y mármoles la disolución en los bordes de grano de la roca erosiona su superficie.

Los silicatos reaccionan en menor grado y sus productos de meteorización son diferentes. Sin embargo, los resultados finales en lo que a la descomposición de la piedra se refiere son exactamente los mismos. Un efecto a gran escala puede observarse en las mesetas ("plateau") de basaltos de la India, que son rocas constituidas por silicatos. Desde su formación, hace unos 60 millones de años, la meteorización los ha convertido en bauxita hasta una profundidad de algún centenar de metros.

En las atmósferas urbanas actuales los óxidos de azufre y nitrógeno se están convirtiendo en los agentes más destacados del desmoronamiento de las piedras. El dióxido de azufre procede de la combustión de combustibles fósiles que contienen compuestos de azufre (como por ejemplo la pirita en el carbón). Los óxidos nitrosos proceden de la oxidación del nitrógeno atmosférico. Las reacciones del dióxido de azufre con los materiales de construcción son bien conocidas, sin embargo la información referente a las reacciones de los óxidos nitrosos es más exigua.

El dióxido de azufre transforma la calcita, que es bastante estable, en yeso que es mucho más soluble en agua. De acuerdo con esto, el yeso no se acumula sobre la superficie de la piedra en aquellas zonas en donde las lluvias torrenciales sean frecuentes. Por el contrario, se lava y la piedra fresca se pone al descubierto para un ataque ulterior. (En las partes de los edificios no alcanzadas por la lluvia, tales como bajo los alféizares y los frisos, es probable que el yeso permanezca.) En climas más secos se acumula un espesor apreciable de yeso en las paredes exteriores. Por ejemplo, se ha observado que las esculturas del Erecteion de la Acrópolis han acumulado yeso hasta un centímetro de profundidad. La continua lixiviación del mineral destruye lentamente el relieve superficial a medida que se forma nuevo yeso a partir del mármol de las esculturas.

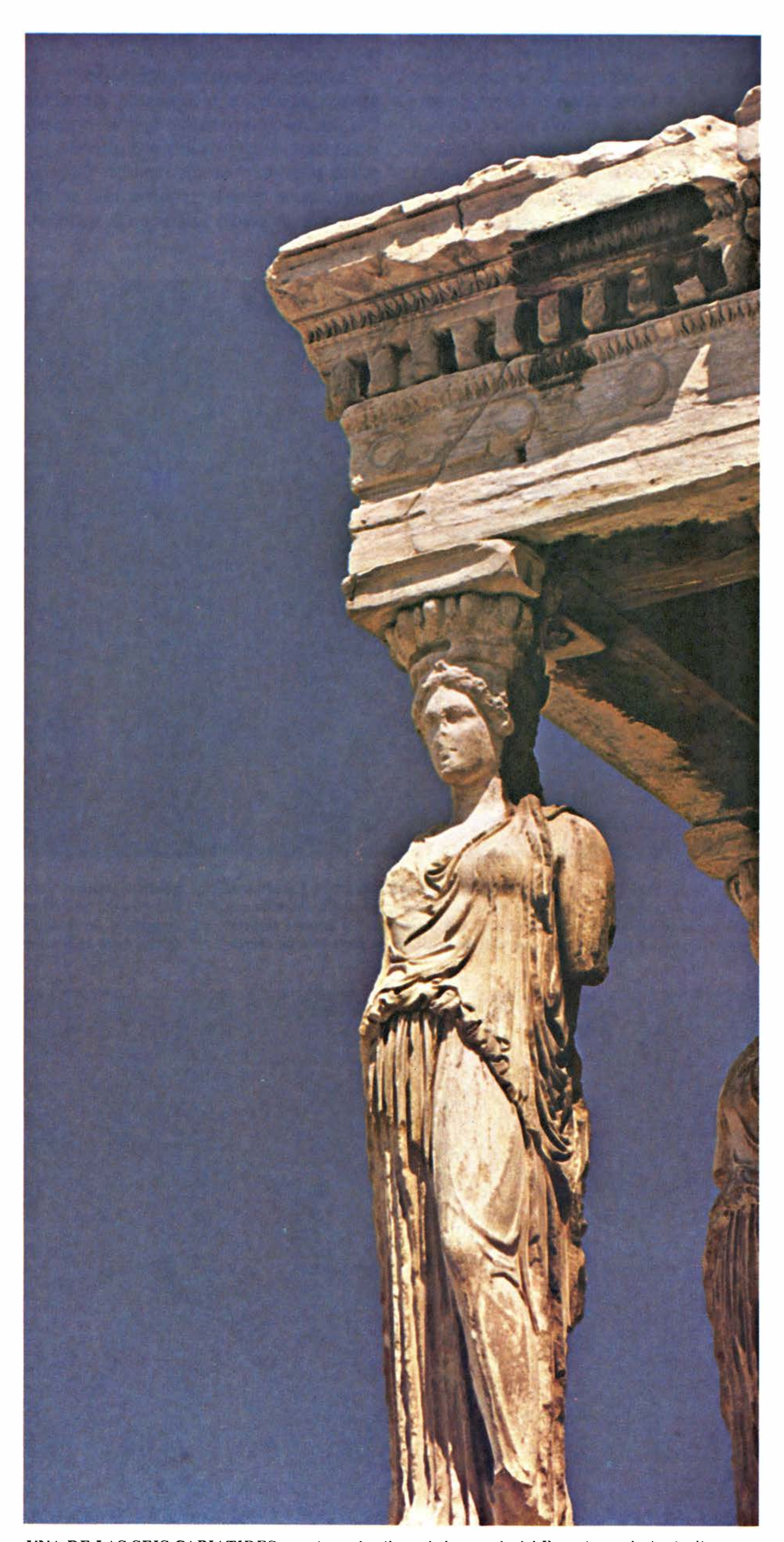
La meteorización de la piedra supone algo más que reacciones del material con

soluciones y gases atmosféricos. Los efectos mecánicos también son importantes. Estos incluyen la acción de humectación de los granos de la piedra y el daño que se produce cuando el agua penetra en la piedra y se hiela. Tales procesos son responsables de la mayor parte del daño estructural en la piedra; las reacciones químicas que he descrito están limitadas principalmente a la superficie. Los efectos finales de la meteorización son, por tanto, la formación de costras de suciedad, el desgaste de las superficies pétreas, los desperfectos estructurales y, ante todo, la pérdida por parte de la piedra que envejece de la resistencia al desmoronamiento.

El esfuerzo dirigido a la conservación comienza con la limpieza. La suciedad superficial de las piedras de los edificios se debe principalmente al hollín de las calles que recubre la piedra e incluso se incrusta en las capas más externas. La calcita, tras haber sido disuelta, puede recristalizar en la misma fachada o puede transformarse en yeso. Muchas de las incrustaciones sucias en la piedra son en realidad combinaciones de calcita y yeso que en el proceso de transformación han incorporado sílice, cenizas transportadas por el aire y materia carbonosa procedente del aire polucionado.

Otras decoloraciones comunes se producen por eflorescencias, que son sales solubles en agua que cristalizan en la superficie. Algunas de ellas, tales como el yeso en cemento, se hallan en principio ya presentes en el material y forman eflorescencias como resultado de la acción de la meteorización química. Otras, por ejemplo el cloruro sódico en regiones marítimas, se depositan en la piedra mediante aerosoles. Algunas más se forman por reacciones de sustancias del material con sustancias depositadas sobre él; una muestra lo constituye la reacción del yeso con cloruro sódico procedente de los aerosoles oceánicos, formando sulfatos sódicos corrosivos. Además, las sales incrementan la concentración de iones en la piedra y con ello producen eflorescencias potenciales todavía más solubles en el agua de lo que normalmente son.

Sobre la superficie de la piedra, las eflorescencias constituyen simplemente decoloraciones. Sin embargo, éstas son susceptibles de hidratarse, es decir, de incorporar agua en su estructura cristalina. Cuando las eflorescencias resultan hidratadas por detrás o en el interior de la piedra, la destrozan materialmente. Un fenómeno relacionado con ello es la oxidación de las barras de refuerzo de hierro u otros anclajes metálicos empleados en fijar bloques de piedra o cemento. Los productos de oxidación del hierro (la limonita es uno de ellos) son menos densos que las sustancias reac-



UNA DE LAS SEIS CARIATIDES que sirven de pilares de la entrada del Erecteion en la Acrópolis; como puede apreciarse, muestra los efectos de 2300 años de meteorización. El mármol ha sido dañado por dióxido de azufre, el cual originó una capa de yeso sobre la superficie. Las áreas adyacentes del edificio han sido también deterioradas por la oxidación de las barras de hierro instaladas entre 1902 y 1909 para reforzar.

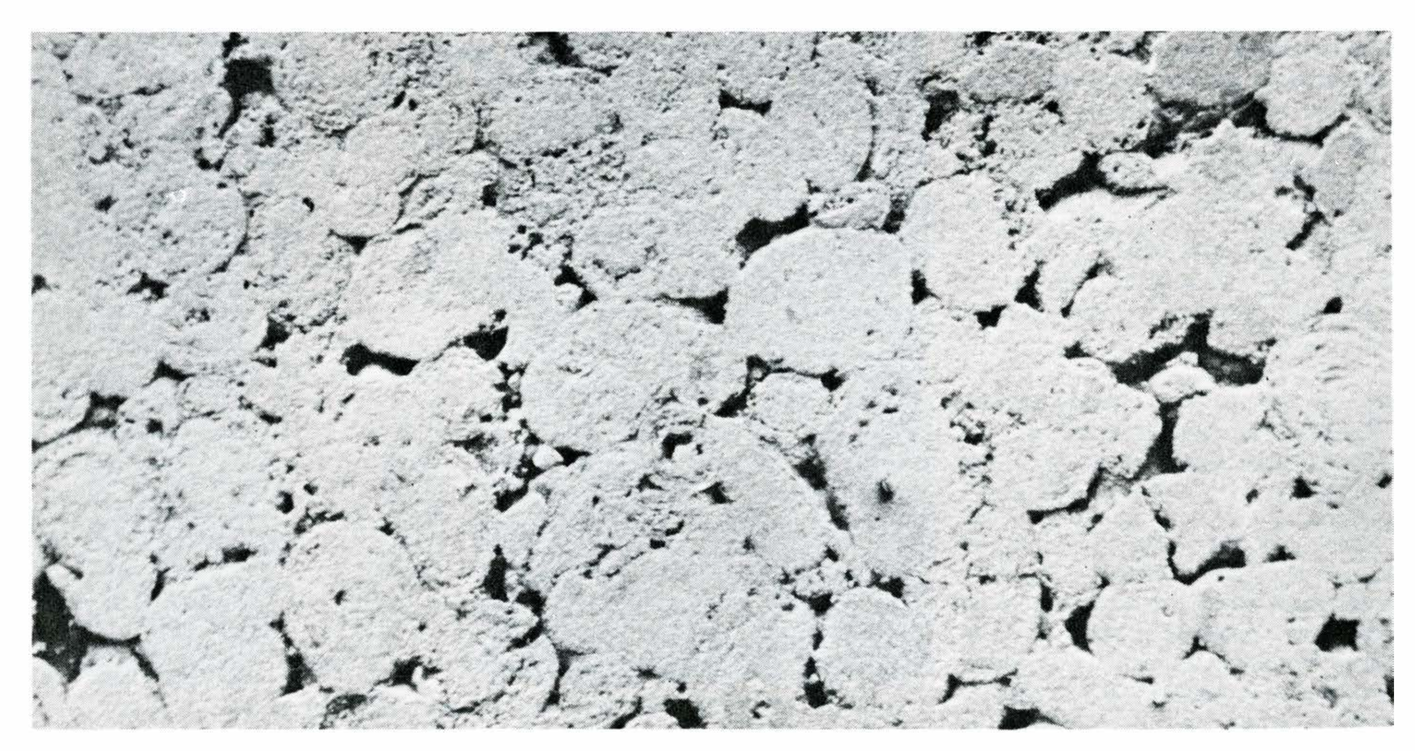
cionantes y, por tanto, ocupan un volumen mayor y así deterioran la piedra. (La limonita también emigra hacia la superficie y origina una decoloración en forma de parches de color amarillento y pardo.) La oxidación de las barras de hierro instaladas en edificaciones de la Acrópolis para anclar los bloques de mármol durante la restauración realizada de 1902 a 1909 constituye en la actualidad el peor enemigo del mármol de estos edificios.

Las superficies de la piedra pueden limpiarse con medios mecánicos y químicos. Resulta más conveniente aplicar primero los medios mecánicos debido a que los químicos presentan ciertos reparos. Sin embargo, cada método requiere que se elimine algo de piedra junto con la suciedad. Por ello es necesario escoger el proceso de limpieza teniendo en cuenta el quimismo de la roca, de tal modo que se elimine la menor cantidad posible de piedra.

Los métodos mecánicos de limpieza incluyen el cepillado de la piedra y la aplicación de un chorro de aire, agua o arena. Por ejemplo, las eflorescencias más nocivas, que son las de sulfatos complejos de



CALIZA DE PORTLAND METEORIZADA procedente de la Catedral de San Pablo de Londres, tal como se muestra en una micrografía obtenida con microscopía de barrido con un aumento de 120 diámetros. En la parte superior se observa un área próxima a la superficie de la piedra; la parte inferior corresponde al interior, visible merced a un corte normal a la superficie. El material más obscuro que rellena el espacio poroso del interior es calcita recristalizada formada a partir de soluciones creadas por meteorización de la superficie. La calcita de la roca reacciona con dióxido de carbono disuelto en agua de lluvia.



SECCION MAS PROFUNDA de una caliza de la Catedral de San Pablo, mostrada en esta micrografía de microscopía de barrido, aumentada 40 veces. Los espacios porosos abiertos indican que la parte inferior está menos meteorizada. La meteorización se extiende unos 2,5 mm por debajo de la superficie.

calcio y sodio, se eliminan cepillando la superficie. El vapor y el agua caliente, por los que aumenta la solubilidad de estas eflorescencias, son eficaces para eliminarlas no sólo de la superficie sino también de los niveles más profundos.

Si bien el grado en que debe eliminarse la suciedad hasta que el edificio pueda considerarse limpio es en gran parte materia opinable, hasta qué punto hayan de quitarse las eflorescencias puede determinarse con bastante precisión. Nuestra experiencia basada en una variedad de piedras muestra que los iones sodio y sulfato se han de reducir hasta un 0,03 por ciento (en peso) de la piedra. Es probable que la piedra contenga también otros tipos de eflorescencia. Se determina su composición iónica (y con ello el grado hasta el que debe ser eliminada), mediante la colocación de la roca en agua desionizada. Los iones emigran hacia el agua y pueden identificarse; su cantidad puede valorarse rápidamente y con precisión mediante espectrofotometría atómica de absorción.

En cuanto a los métodos químicos, las piedras no calcáreas y la mampostería no vidriada se limpian rutinariamente con productos químicos fluorurados, como el ácido fluorhídrico y el bifluoruro amónico. Otros productos químicos (ácidos, alcalinos o quelantes) son útiles en la limpieza de la mayoría de los demás tipos de piedra y mampostería. Como apunté antes, todos los agentes químicos de lixiviación ofrecen ciertos inconvenientes. Por ejemplo, los alcalinos dejan trazas en su paso que forman eflorescencias. Por otra parte, todos los agentes químicos de limpieza penetran profundamente en la piedra y con ello tienden a corroerla y debilitarla.

La limpieza de edificios viejos pone frecuentemente al descubierto piedra en estado de desmoronamiento. Esta piedra debe ser consolidada. Hay tres métodos habituales de hacerlo.

Consiste el primero en reemplazar los constituyentes de la piedra que sean propensos al ataque atmosférico. Por ejemplo, el hidróxido de bario se introduce dentro de la piedra. El reemplazamiento del calcio de la calcita o del yeso por bario forma carbonato o sulfato de bario que son menos solubles o bien forma una solución sólida de carbonato de calcio y bario y sulfato de calcio y bario. Durante un siglo se han venido utilizando diferentes versiones de este procedimiento. Una dificultad inherente es la obtención de una verdadera solución de bario que penetre en la piedra con facilidad. Además, las velocidades de reacción que conducen a la formación de los productos resistentes de bario son bastante lentas.

Un segundo método consiste en producir la precipitación de los productos quími-





EJEMPLARES TRATADOS de un mármol de Georgia meteorizado en micrografías obtenidas con microscopía de barrido bajo aumentos de 55 y 120 diámetros. El material blanco en el espacio poroso de la piedra es un polímero impregnado. En la micrografía superior el polímero no llena por completo los espacios porosos, solamente los hace más tortuosos de modo que el agua penetra con menor facilidad. Un tratamiento con un polímero que llene completamente el espacio poroso no es deseable, puesto que reduce la capacidad de la piedra para "respirar", es decir, para permitir la emigración, hacia fuera, del agua que entra en la piedra.

camente resistentes en los espacios porosos de la piedra. Por ejemplo, el dióxido de silicio puede depositarse en los poros a partir de silicatos orgánicos solubles en agua o ésteres de silicona. Si el tratamiento se realiza correctamente, el dióxido de silicio forma enlaces con la sílice de la piedra. Por ello lo mejor es limitar este tratamiento a areniscas y otras rocas que contengan silicatos. Debe tenerse la precaución de estar seguro que los líquidos introducidos en la piedra precipiten rápidamente. Si no lo hacen, éstos tienden a emigrar hacia la superficie a medida que se van evaporando. En la superficie originan costras que son perjudiciales para la piedra.

El tercer método de consolidar la piedra consiste en tratarla con monómeros y prepolímeros orgánicos. Después de que este tipo de sustancia se ha introducido en la roca se la hace polimerizar por medio de un agente curante en la solución. La polimerización produce la recementación de los granos sueltos de la piedra meteorizada. Nuestro grupo de trabajo en la conservación de la piedra ha centrado su atención en la aplicación de estos polímeros sintéticos.

Algunos polímeros no sólo poseen propiedades de cementación sino que a la vez repelen el agua. Ambas propiedades son extremadamente útiles para la preservación de la piedra. Sin embargo, algunas de las restantes propiedades de los polímeros pueden resultar perjudiciales para la piedra. Si los polímeros absorben gases activos, éstos pueden acelerar la velocidad de degradación. Si absorben la radiación ultravioleta, pueden descomponerse ellos mismos y, a la larga, dejan a la piedra sin protección. La selección de los polímeros para tratamiento de la piedra debe basarse, por tanto, en determinar previamente que el polímero no aumente la degradación ni reaccione con las sustancias del medio ambiente.

En las primeras etapas de nuestro trabajo, descubrimos que determinados ejemplares de mármol que habían sido tratados con varias resinas epoxídicas se deterioraban más rápidamente que el propio mármol no tratado, en una atmósfera concentrada de dióxido de azufre. Posteriormente determinamos que epoxias que llevaban radicales alifáticos eran las que producían el resultado no deseado. Tras nuevos trabajos encontramos que estas epoxias absorbían al dióxido de azufre en abundancia. Examinando los tamaños de los poros en películas epoxídicas, encontramos que éstos variaban de uno a dos nanómetros. Dado que el tamaño de la molécula de dióxido de azufre es de 0,5 nanómetros, resulta inmediato que el dióxido de azufre podía ser fácilmente absorbido por la epoxia y pasar a la piedra. Obviamente, este polímero no es adecuado para la protección de la piedra.

Los polímeros que se descomponen bajo la radiación ultravioleta se comportan posiblemente así porque la radiación rompe los enlaces entre los átomos de carbono de los polímeros. Por esa razón se buscan polímeros que no absorban esta parte de la radiación solar ultravioleta que penetra en la atmósfera terrestre hasta nivel del suelo (con longitudes de onda superiores a los 290 nanómetros). Respecto a esto, los polímeros de flúor-carbono se muestran especialmente adecuados.

La degradación de polímeros por acción de la radiación ultravioleta ambiental es lenta. Las epoxias que se degradan más rápidamente tardan unos seis meses en mostrar los primeros síntomas de alteración. En nuestros experimentos, hemos activado este proceso exponiendo los polímeros a radiación ultravioleta de longitudes de onda menores, teniendo la precaución de mantener una correlación admisible entre la degradación acelerada y la que resultaría de unas condiciones naturales de exposición.

Síntoma precoz de la degradación debida a la absorción de luz ultravioleta es la decoloración del polímero. El material comienza a mostrarse amarillo; se torna cretoso y, a la larga, se desprende de la piedra. En el proceso de degradación natural las epoxias expuestas a un medio ambiente correspondiente a una latitud media mostraron en unos seis meses un patente amarillear. Los ejemplares de flúor-carbono expuestos durante los últimos cinco años no revelan todavía ninguna decoloración. Nuestros experimentos acelerados nos han conducido a resultados análogos: películas epoxídicas se decoloraron en 10 horas y películas de flúor-carbono no mostraron ningún cambio tras 400 horas.

También nos hemos ocupado del desarrollo de medios eficaces para la detección de la degradación de los polímeros. Uno de los métodos seguidos por nosotros consiste en determinar, mediante espectrofotometría, la absorción ultravioleta de películas de polímeros sometidos a una canti-



MADONNA, sometida a un proceso de meteorización, que se encuentra en un cementerio de la ciudad de Nueva York. La meteorización es el resultado de la reacción de la piedra con óxidos de carbono, azufre y nitrógeno disueltos en el agua de lluvia. En las áreas descubiertas de la estatua, los productos de la reacción han sido lavados por la lluvia en un proceso de limpieza natural, pero en las zonas escondidas y parcialmente protegidas de la cara se ha formado una costra que ha empezado a caerse agravando la desintegración.

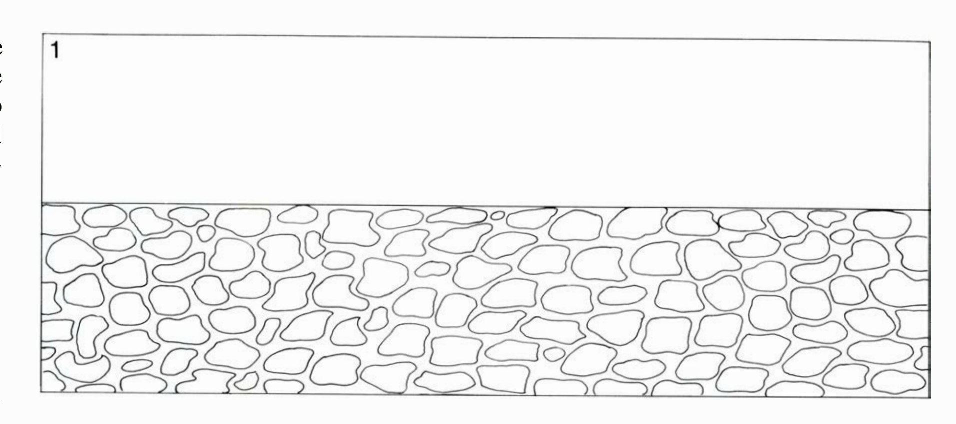
dad conocida de radiación ultravioleta. De acuerdo con otro, se mide el ángulo de contacto que forma una gota de líquido (generalmente agua) con la superficie del polímero. El ángulo de contacto varía conforme la superficie se va degradando.

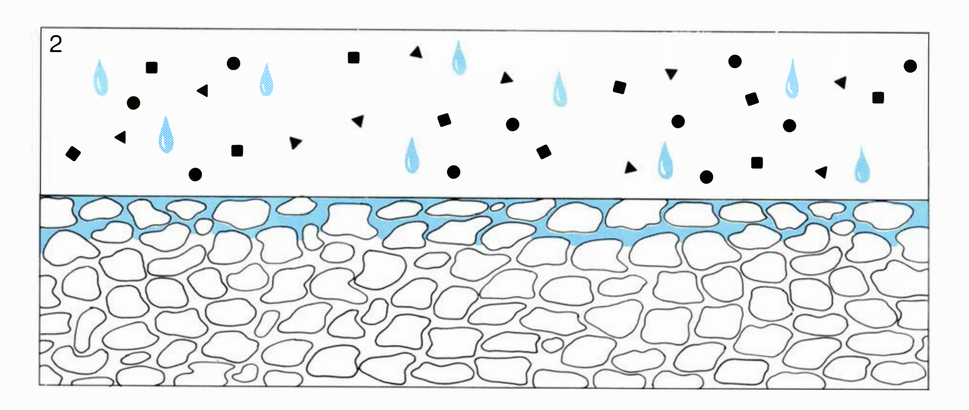
El ensayo riguroso de un polímero que se esté tomando en consideración para ser aplicado a una piedra como protector es más oportuno para materiales compuestos, preparados al objeto de reparar o reemplazar ciertas estructuras, cornisas, por ejemplo. Los compuestos suelen hacerse empleando un polímero como medio de unión para piedra triturada y clasificada que tenga esencialmente el mismo contenido mineral y color que la piedra que hay que remendar. Cerca de la mitad de la superficie expuesta de un compuesto está formada por el polímero. Por tanto, la degradación del polímero deteriora a la vez el aspecto y las propiedades estructurales del compuesto.

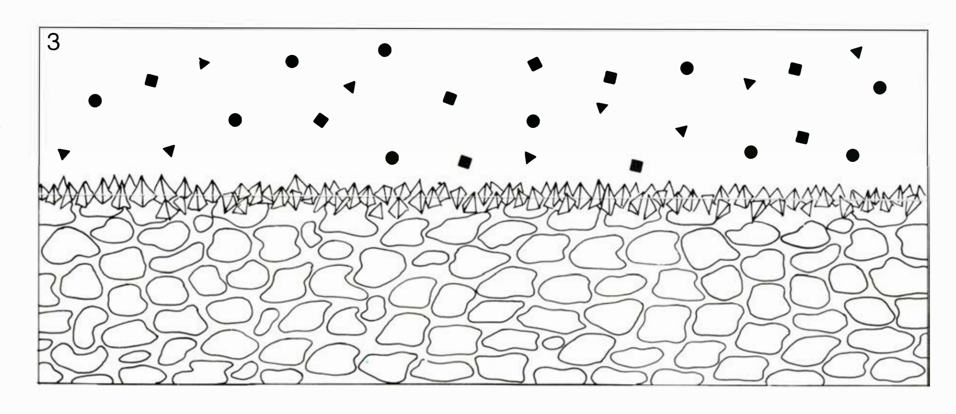
Esta consideración no es tan importante cuando se emplea el polímero para consolidar la piedra, pero deben satisfacerse otros requisitos si se quiere que el tratamiento tenga éxito. Es especialmente importante que el polímero impregne la piedra profundamente, y que lo haga así sin rellenar enteramente los poros. Los poros son necesarios porque la piedra debe retener su capacidad de "respirar". Si se tapan los poros, el agua puede quedar atrapada por detrás de la zona tratada y eventualmente puede originar la desintegración de dicha zona y de parte también de la zona no tratada. (Se observa un fenómeno similar en viejos edificios, en los que las costras formadas por meteorización en la superficie de la piedra impiden la emigración hacia el exterior del agua atrapada.)

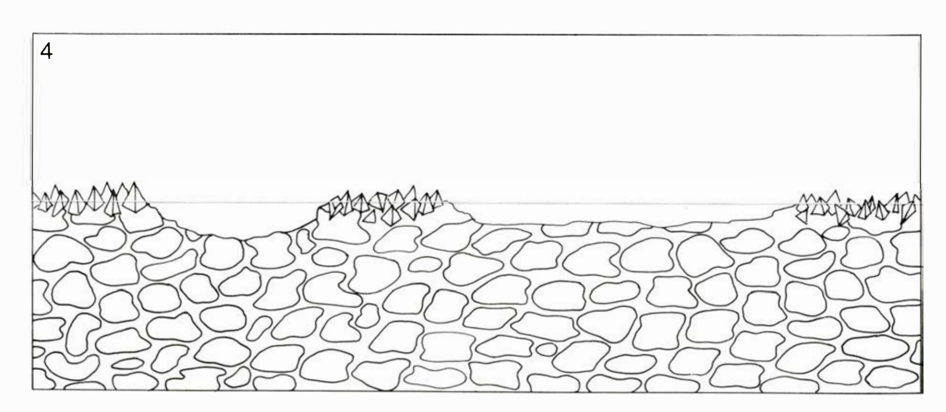
Por ser viscosos, la mayoría de polímeros no penetran fácilmente en la piedra. Sin embargo, forman fácilmente una solución con solventes orgánicos, los cuales pueden utilizarse como medios de transporte para hacer entrar al polímero profundamente en la piedra. Ideé un método para lograrlo: se comienza con el relleno de los espacios porosos con un solvente que penetre fácilmente; luego se pone en contacto la piedra con series de mezclas polímero-solvente en las que la concentración del polímero se incrementa progresivamente; a la larga, el polímero ha penetrado en la piedra lo suficiente para su misión. El solvente emigra hacia el exterior por difusión.

La planificación de un tratamiento de consolidación de un edificio se basa en experimentos de laboratorio con piedras del edificio en cuestión. La planificación óptima exige ciertas propiedades que una piedra tratada debe adquirir. Estas son: (1) grado de movimiento por capilaridad del

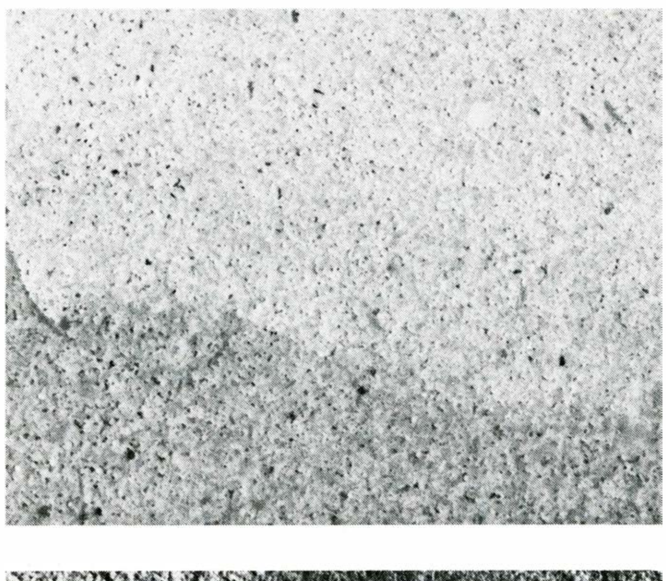
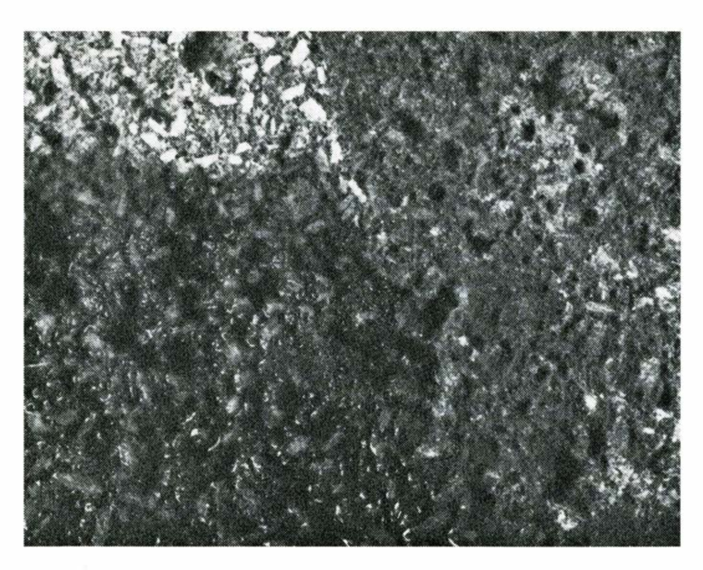


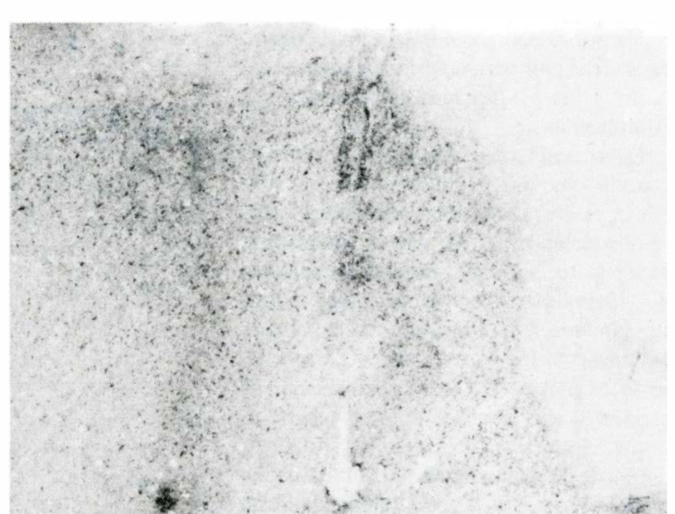






MECANISMO DE METEORIZACION, representado esquemáticamente. Después de que una piedra no alterada *(1)* ha sido expuesta a la intemperie, ésta sufre el ataque de los óxidos de carbono, azufre y nitrógeno que forman una solución con el agua de la lluvia *(2)*. La solución penetra cierto trecho en la piedra. Por recristalización en la superficie y en profundidad, y por la incorporación de hollín del medio ambiente, se forma una costra *(3)*. Si se rompen y separan partes de la costra *(4)*, ésta puede arrastrar consigo constituyentes de la piedra; de este modo resulta abrasionada y queda al descubierto para un nuevo ataque químico.



PIEDRAS DE CONSTRUCCION que muestran los efectos de un tratamiento con polímero. De izquierda a derecha y de arriba abajo, las piedras son, respectivamente, caliza de Portland de la Catedral de San Pablo de Londres, basalto del Templo de Borobudur en Indonesia, arenisca del Castillo de Kenilworth en Gran Bretaña y mármol de Vermont. En todos los casos la porción tratada es la derecha. Se colocó cada muestra en agua somera durante unos pocos minutos, con el canto inferior hacia abajo. El agua ascendió apreciablemente más en la parte no tratada de la piedra que en la parte de la misma tratada con polímero.

agua en la piedra, (2) permeabilidad de la piedra, (3) resistencia a la compresión y (4) reactividad química. Aunque a estas propiedades se les puede asignar valores cuantitativos, no pueden desarrollarse valores aplicables universalmente, debido a la existencia de múltiples tipos de piedras. Aun cuando dos piedras de construcción se hayan tallado a partir de la misma roca madre, pueden presentar diferentes propiedades si han sufrido meteorización en diferentes partes de un edificio. Por ello deben compararse ejemplares de piedra tratados con otros no tratados al objeto de planificar la terapéutica.

Entre los objetivos a tener en cuenta, uno es repeler el agua en la superficie de la piedra al tiempo que se posibilita el escape del agua desde el interior de la misma (procedente de las partes del edificio no sometidas a tratamiento). He aquí de nuevo una razón para controlar cuidadosamente la densidad de impregnación del polímero. Una impregnación de densidad elevada forma barreras al escape del agua que no son deseables; una impregnación de baja densidad reduce, pero no bloquea, el movimiento de líquidos y gases, porque reviste los poros e incrementa la tortuosidad de los conductos porosos. En nuestros mejores tratamientos, muchas piedras han mostrado una reducción de la absorción del agua hasta la mitad.

La expresión 'resistencia compresiva' describe normalmente la resistencia de la roca en compresión, pero también se refiere a otras propiedades mecánicas de la roca. La mejora de la resistencia compresiva, como resultado del tratamiento, es una medida del aumento del peso específico, del índice de abrasión y de la resistencia tensil. Para comprobar la resistencia compresiva se suele aplicar una fuerza a la piedra hasta que ésta se rompe. Tal método es inapropiado para una piedra alterada, porque la meteorización produce una zonación gradual en la que las propiedades cerca de la superficie están alteradas al máximo y en las zonas más lejanas de la superficie se asemejan a las propiedades de la piedra no meteorizada. Por ello debe comprobarse la resistencia de la zona meteorizada capa por capa.

Falta un desarrollo de medidas patrón de la reactividad química de la piedra. Nuestras especificaciones para un contratista indican que un piedra tratada no experimentará más de la mitad de la reactividad que otra no tratada durante las primeras 24 horas de exposición en una atmósfera de dióxido de carbono y dióxido de azufre dada. (Nuestras atmósferas experimentales que se hallan ligeramente más concentradas que las normales, contienen 2 por ciento de dióxido de carbono y 10 partes por millón de dióxido de azufre.)

Una estimación global de la mejora de las propiedades mecánicas como resultado del tratamiento de conservación puede obtenerse con el ensayo de solidez ("soundness test"), adoptado por la American Society for Testing and Materials. En este en-

sayo se deposita sulfato sódico anhidro en el espacio poroso de la piedra mediante una solución llevada a saturación a una temperatura de 21 grados Celsius. A continuación, se seca la piedra. El sulfato sódico anhidro absorbe el agua cuando se coloca la piedra de nuevo en la solución saturada. Este tratamiento crea esfuerzos de tensión en el interior de la piedra. Al repetir este proceso cíclico un determinado número de veces, el resultado consiguiente es la fragmentación de la piedra.

En nuestras investigaciones, ejemplares de caliza de Indiana comenzaron a fragmentarse en el segundo ciclo del ensayo, mientras que algunos ejemplares de la piedra tratados resistieron más de 20 ciclos. (La solidez de la piedra tratada, tal como se determina por este método, no sólo refleja la resistencia a la tracción, sino también la capacidad de la piedra para la absorción de agua.)

Modificamos el ensayo forzando la penetración de la solución de sulfato sódico en la piedra, en el vacío. Este procedimiento elimina el efecto de repelencia de agua debido al polímero presente en la piedra tratada; con ello se acelera rápidamente el proceso de ensayo. Aplicamos el ensayo para determinar la solidez de ejemplares sometidos tanto a impregnaciones profundas como someras con una variedad de polímeros, tales como epoxias, acrílicos de flúor-carbono y resinas de silicona. Los ejemplares de control no tratados comenzaron a desmoronarse en el segundo ciclo. El modo de degradación puede calificarse de formación de arena, por el que los granos individuales se desprenden de la piedra. Ciertos tratamientos, en particular los profundos pero con impregnaciones de baja densidad de epoxia, también dieron lugar a la formación de arenas. Algunos otros tratamientos, especialmente aquellos que suponían el recubrimiento de la superficie de la piedra con revestimientos de silicona, dieron por resultado la desintegración por desconchamiento. En la meteorización natural, la caliza de Indiana se descompone por formación de arena, pero cuando se desarrollan costras sucias en la superficie, ésta se desconcha gradualmente. El tratamiento con flúor-carbonos produjo resultados intermedios.

Resulta ya evidente que todo tratamiento suele afectar desfavorablemente a una propiedad al tiempo que mejora otra. De este modo parece que el mejor tratamiento no producirá necesariamente los resultados ideales para una propiedad particular. En cambio se deberá adoptar una fórmula de compromiso que depare una piedra tratada con aproximadamente las propiedades de una piedra madre no tratada ni haya estado sujeta a los efectos implacables de la meteorización.

El comportamiento alimentario de los mosquitos

Comportamiento de Aedes aegypti, *cuya hembra se alimenta de sangre. El aparato chupador es una pieza de un mecanismo biológico delicado construido con exquisitez, que en nada recuerda a una aguja hipodérmica*

Jack Colvard Jones

Existen unas 3000 especies de mosquitos. La mayoría no resultan peligrosas para el hombre, a pesar de que su picadura puede ser muy molesta hasta el punto de forzar el abandono de zonas idóneas, por lo demás, para su vida. Hay, sin embargo, 100 especies por lo menos que son realmente peligrosas para los humanos. Enfermedades tales como la malaria (producida por protozoos), la filariasis (causada por filarias) y la fiebre amarilla (originada por un virus) se transmiten al hombre exclusivamente a través de la picadura de determinados mosquitos. ¿Cómo llegan los mosquitos a descubrir la presencia del hombre y cómo chupan su sangre? ¿Qué hace que su picadura produzca prurito? ¿Cómo transmiten las enfermedades ciertos mosquitos? Para dar con la respuesta a estas preguntas y a otras con ellas relacionadas, mis colegas y yo mismo hemos estudiado el comportamiento alimentario de la especie de mosquito más peligrosa: *Aedes aegypti*. Se trata de una criatura bonita, con zonas de escamas plateadas que se intercalan con otras de escamas negras, lo que da al insecto el aspecto de un delicado tigre volador. Aunque la fama de *Aedes aegypti* le viene por ser el mosquito de la fiebre amarilla, quizá convenga saber que es portador de un número de enfermedades mayor que cualquier otra especie congénere suya.

Los mosquitos se encuadran entre los Dípteros, extenso orden que abarca moscas y mosquitos. En este orden de insectos encontramos a muchas especies en las que machos y hembras se alimentan de sangre. En el caso particular de los mosquitos, sin embargo, sólo las hembras chupan sangre; pero no todas las especies de mosquitos se alimentan de sangre humana: muchas de ellas prefieren la sangre de aves o de otros animales. Se sabe que los mosquitos se alimentan de la sangre de numerosas especies de mamíferos y de diversas especies de reptiles e incluso de otras especies de los propios insectos.

Aedes aegypti es una de las especies de mosquitos en que las hembras prefieren la sangre humana. Los machos también se sienten atraídos por los seres humanos y se posan y se pasean por su piel. Ahora bien, por más que un mosquito macho aplique su probóscide sobre la piel humana nunca llegará a atravesarla ni chupará la sangre.

Sólo las hembras adultas buscan sangre humana. El ciclo biológico de un mosquito tiene varias etapas, y su comportamiento alimentario en cada período varía tanto como su aspecto. Comienza a vivir en estado de huevo fecundado, flotando en un estanque o charco de agua. El embrión del mosquito se desarrolla con rapidez dentro del huevo y empieza a absorber el material vitelino del huevo que pasa a su estómago recién formado, a las 24 horas de edad. Cuando la larva del mosquito está lista para salir del caparazón, su faringe, parte superior del tubo digestivo, comienza a dar rápidas sacudidas; estas sacudidas provocan que la sangre de la larva dilate su cabeza de suerte que quede formando una espina aguda que empuja contra el caparazón y lo rompe. Tan pronto como la larva sale del huevo, nada por los alrededores y se alimenta ya filtrando el agua sirviéndose de dos grandes haces de cerdas quitinosas en forma de abanico que se encuentran en la parte delantera de su cabeza. Los abanicos provocan una corriente de agua que lleva el alimento hacia las piezas bucales y ayuda a llenar de comida la boca escondida en profundidad.

La larva posee un sifón de respiración en su extremo posterior que debe salir a la superficie para respirar, pero muchas veces la larva debe zambullirse para alimentarse en el fondo. La larva del mosquito es omnívora: se alimenta de bacterias, polen, plantas microscópicas y una amplia gama de otras sustancias. La larva come casi continuamente: utiliza alrededor de un 95 por ciento de su tiempo para filtrar agua y así obtener las partículas alimenticias. La larva prefiere las aguas contaminadas y crece muy rápidamente en cultivos casi puros de bacterias. En pocos días completa todo su ciclo biológico larval, que consta de cuatro etapas diferentes, creciendo y haciéndose más compleja la larva en cada una de las etapas.

Durante el período larval, el insecto se ha estado preparando para llegar a convertirse en adulto. Las patas, alas y piezas bucales del mosquito adulto se han ido configurando lentamente y en la última etapa larval ya se pueden ver bien conformadas a través de la piel de la larva. Pero ya que la transformación completa en adulto supone un cambio tan radical, el animal necesita una etapa intermedia de pupa para culminar el proceso.

A simple vista, la pupa parece un bastoncillo. A diferencia de la larva, está pegada a la superficie del agua por unas trompetillas respiratorias que salen del tórax. Si no se le molesta, permanece tranquilamente flotando justo debajo de la película superficial, pero si es cubierta por una sombra bucea con rapidez hacia el fondo. Ahora bien, si la sombra se repite varias veces, se adapta rápidamente y ya no se sumerge más.

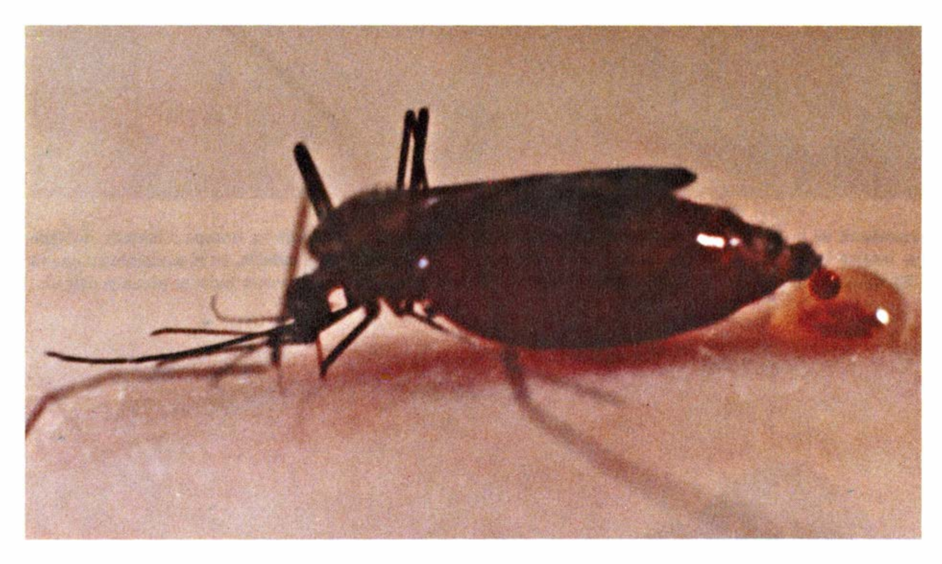
En el estadio de pupa tanto la boca como el ano quedan precintados desde el mismo momento en que la pupa emerge de la piel de la larva; por consiguiente, la pupa no puede tomar alimento ni expulsar desechos sólidos o líquidos. La antigua parte central del intestino de la larva contribuye de modo claro al rápido desarrollo de la parte central del intestino del adulto, o estómago, ya que es literalmente digerido por la pupa y el joven adulto. En

MOSQUITO HAMBRIENTO, hembra de la especie transmisora de la fiebre amarilla *Aedes aegypti*, fotografiado en el momento en que inserta los estiletes chupadores de su trompa en la piel de una mano humana. El mosquito tiene sus seis patas apoyadas sobre la piel y el extremo de su trompa o labium, doblado hacia atrás en forma de horquilla curva para el cabello, en el momento en que va a chupar la sangre. El abdomen, vacío, se encuentra todavía plano y delgado.

MOSQUITO SACIADO, fotografiado escasos minutos después de alimentarse de sangre y retirar los estiletes chupadores de la trompa, de la piel en que estaban clavados. El intestino medio del mosquito, o estómago, está repleto de sangre. El objeto brillante desenfocado que se encuentra en primer plano es la uña de la víctima. Sólo las hembras de los mosquitos se alimentan de sangre. También pueden absorber zumos azucarados, alimento exclusivo de los machos.



HEMBRA DE MOSQUITO POCO FRECUENTE que no sólo ha tomado abundante agua azucarada sino que además ha ingerido posteriormente sangre humana, que se sabe gusta mucho a los mosquitos. El agua azucarada, que se distingue como el líquido claro que contiene algunas burbujas, se encuentra en la parte terminal del abdomen del mosquito, o buche; la sangre se halla en el intestino medio. La mayoría de mosquitos que han tomado agua azucarada no se deciden a buscar sangre hasta después de tres horas.



MOSQUITO HINCHADO de la especie *Anopheles quadrimaculatus*, principal portador de la malaria, que ha ingerido una enorme cantidad de sangre humana. Antes de permitirle alimentarse, se le cortó el sistema nervioso ventral. Un mosquito absorbe normalmente unos 2,8 miligramos de sangre; si se le corta el sistema nervioso ventral, como a éste de la fotografía, beberá hasta cuatro veces más dicha cantidad de sangre. Por tanto, es el sistema nervioso ventral el que proporciona la información de cuándo está lleno el abdomen. Fotografía cedida por Robert W. Gwadz, del National Institute of Allergy and Infectious Diseases.

el instante anterior a que el adulto emerja de la piel de la pupa, empieza a beberse el aire procedente de una burbuja situada delante del tórax. El aire se deglute y pasa al estómago del nuevo adulto; ello provoca que el insecto se hinche y pueda abandonar su indumentaria pupal.

Inmediatamente después de que el joven adulto ha emergido de la crisálida no muestra ninguna intención de alimentarse. Aun cuando se encuentre al lado de flores, agua azucarada o humanos, el mosquito no responde en absoluto. Entre 20 y 24 horas más tarde, comienza a inquietarse y a buscar alimento. Los machos únicamente sorben zumos azucarados, como puede ser el néctar de las flores. En el campo y en el laboratorio, los mosquitos acudirán a determinadas flores y comerán de frutos colocados en su jaula. Puesto que prueban el néctar de flores de determinadas plantas y pueden distinguir entre diferentes tipos de azúcares, desempeñan obviamente un papel importante en la polinización de ciertas plantas.

Las hembras beberán también jugos azucarados, pero cuando a una hembra hambrienta se le da a escoger entre agua azucarada y sangre escogerá siempre la sangre. Si a un macho se le ofrece la elección, no dudará en optar por el agua azucarada. Cuando los mosquitos, machos o hembras, beben agua azucarada, la solución va a parar al buche, engrandamiento del esófago en forma de bolsa. La solución se almacena en el buche; de vez en cuando regurgitan pequeñas cantidades, que pasan a la parte media del tubo digestivo. Sin embargo, cuando una hembra se ha alimentado de sangre, el fluido no se detiene en el buche sino que va a parar directamente al estómago.

Por término medio, la hembra *Aedes* absorbe 2,8 miligramos de sangre. Normalmente, la hembra bebe mucho menos agua azucarada que sangre. Resulta de cierto interés saber que después de haber tomado agua azucarada hasta la saciedad, la mayoría de las hembras no buscan sangre hasta unas tres horas más tarde. Se puede poner la mano al lado de una hembra alimentada con azúcar, sin temor a ninguna reacción por parte del mosquito. A través de un sistema que nos es desconocido, las células sensoriales que dirigen al mosquito hacia los seres humanos y que desencadenan su reacción parecen quedar inhibidas en su acción por el hecho de haber bebido agua azucarada.

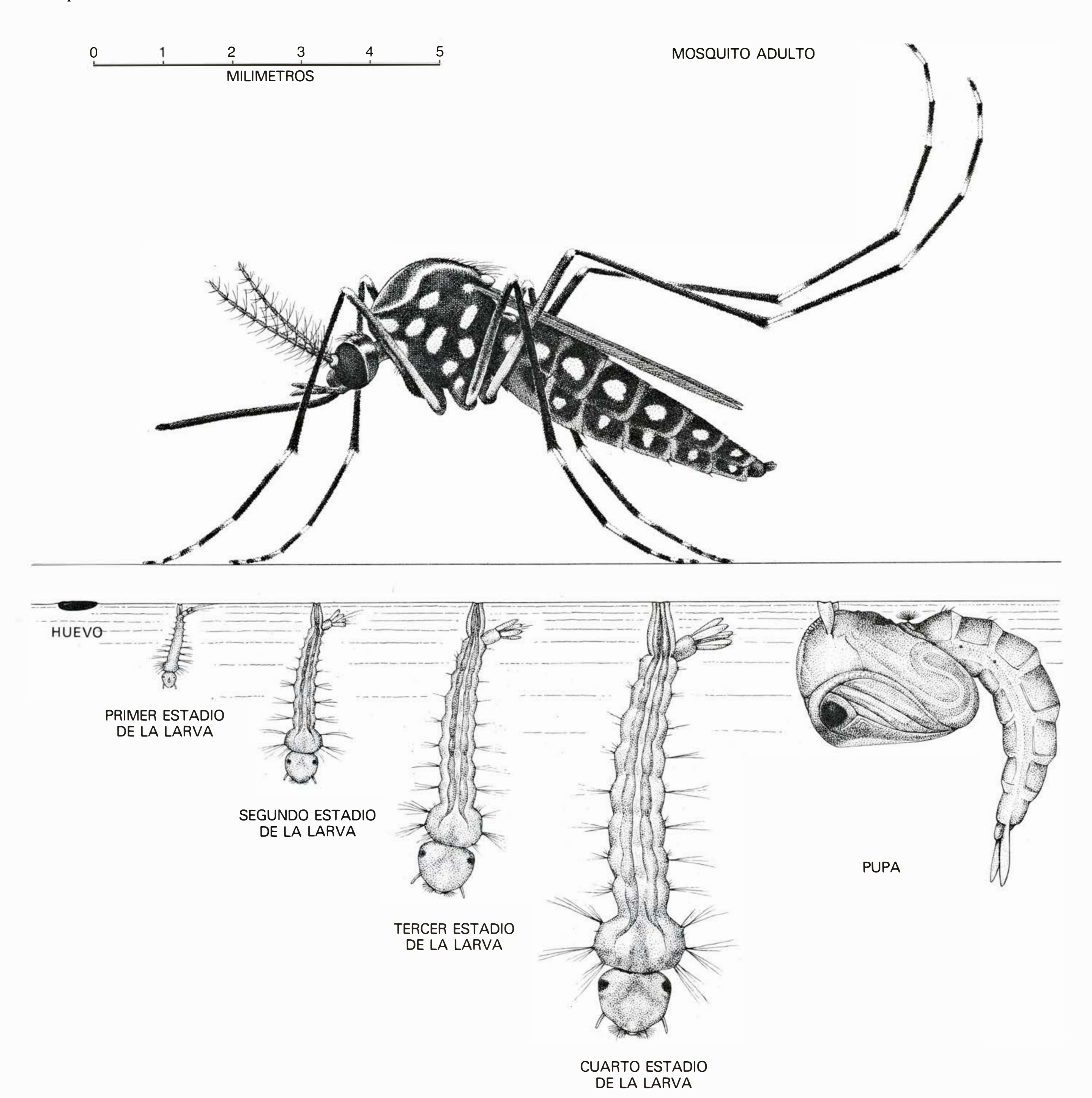
El mosquito adulto posee un buen sentido de la vista y puede seguir perfectamente el movimiento de una mano humana. Parece claro que el factor primario que atrae, desde cierta distancia al mosquito *Aedes* hacia el hombre es, sin embargo, el olor, y que los olores se detectan a su vez por pequeños órganos sensoriales localizados en las antenas del insecto. Esto se puede demostrar con un experimento contundente. Si se le cortan las dos antenas a una hembra hambrienta, pierde el estímulo de la comida, aun cuando se la coloque directamente sobre una mano humana. Se desconoce qué olores exactamente atraen a los mosquitos desde cierta distancia, y se necesitará trabajar bastante para saberlo con algún tipo de certeza. Frecuentemente se sostiene que el ácido láctico, el sebo, los aminoácidos y diversas hormonas atraen a los mosquitos, y que inciden también el anhídrido carbónico, la humedad y los movimientos del huésped. Raquel Galun, en Israel, y W. G. Friend, en Canadá, han demostrado que se puede inducir a los mosquitos a que piquen suministrándoles adenosín trifosfato (ATP). T. Hosoi, de Japón, ha sugerido que el hecho de engullir hasta saciarse después de la picadura pueda deberse al adenosín 5 fosfato. Cualesquiera que sean las sustancias que atraen a los mosquitos, su poder se puede demostrar también con un experimento inmediato: si se hace presión contra un cristal transparente con la mano, y se coloca aquél frente a una jaula en donde hayan hembras hambrientas, un 20 por ciento de éstas irán hacia las huellas de la mano e intentarán perforar la barrera durante una media hora.

También se pueden preparar una serie de experimentos utilizando las dos manos

de un individuo para observar cómo las distintas particularidades del mismo influyen distintamente sobre el insecto. Se descubre así que, entre una mano caliente y otra fría, la hembra de mosquito escogerá la mano caliente, pero si a la hembra se le ofrece sólo la mano fría tomará su alimento de ella. Continuando con las preferencias, el mosquito se inclina más por una mano normalmente caliente que por otra anormalmente caliente, por la mano seca más que por la mano mojada.

En jaulas pequeñas que contengan mosquitos volando libremente resulta difícil comprobar la distinta atracción que ofrecen distintas personas sobre un mismo mosquito, ya que en gran parte la elección depende de que esté más cerca de una mano que de otra. Sin embargo, si una hembra se encuentra exactamente a medio camino entre las manos de dos individuos, puede algunas veces juzgar y escoger entre ellas. Tras haber comparado las manos de 30 personas distintas con la mano de la persona control, que siguió siendo la misma en cada prueba, pudimos clasificar los individuos en grupos que poseían un grado de atracción mayor, igual o menor que el del individuo control.

Para obtener una palmaria demostra-

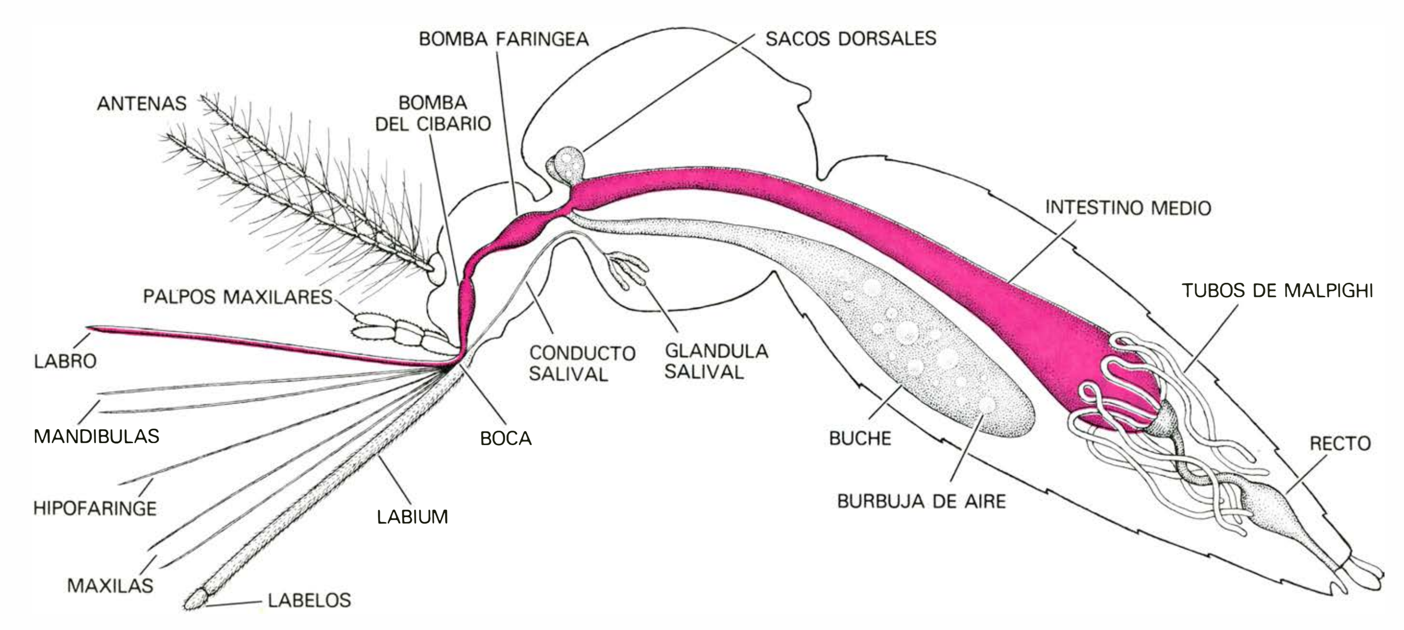


CICLO BIOLOGICO DEL MOSQUITO. Consta de varias etapas, en cada una de las cuales diverge el comportamiento alimentario del insecto. El mosquito empieza su vida como huevo fecundado que flota en el agua *(abajo, a la izquierda).* **Dentro del huevo, el embrión se forma rápidamente y 24 horas después de la fecundación empieza a absorber vitelo del huevo con su estómago recién formado. El huevo eclosiona a las 48 horas de su puesta. En cuanto sale la larva del mosquito, se dispone a alimentarse de polen, plantas microscópicas y bacterias. La larva come casi ininterrumpidamente y crece muy de prisa; varios días más tarde queda terminada la etapa larval, durante la cual ha mudado tres veces y ha pasado por cuatro estadios diferentes, creciendo y haciéndose más compleja en cada uno de ellos** *(cuatro figuras del centro, abajo).* **Antes de convertirse en adulto, el insecto pasa por una etapa de pupa** *(abajo, a la derecha).* **Tanto la boca como el ano de la pupa están sellados; la pupa no puede, por tanto, ni tomar ningún alimento ni tampoco expulsar residuos líquidos o sólidos. (Puede, a pesar de todo, eliminar desechos en forma de gases.) Durante la etapa de pupa del insecto, el antiguo intestino medio de la larva es destruido y parcialmente digerido, y se forma el nuevo intestino medio del adulto. Al cabo de dos días, el estuche de la pupa se rompe, y sale el mosquito adulto** *(arriba).*

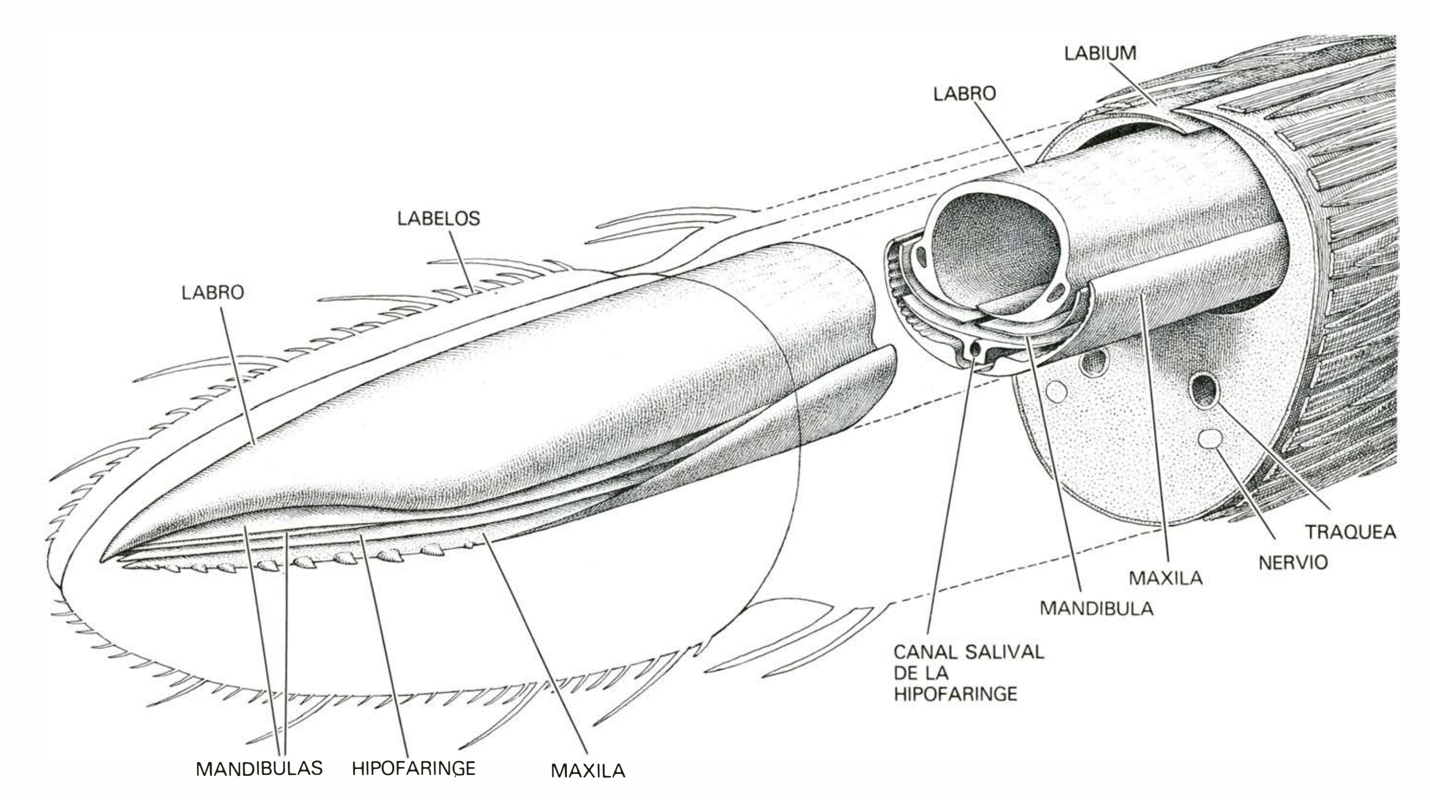
ción de la preferencia del mosquito de la fiebre amarilla por el hombre, basta con introducir la mano con un polluelo sobre ella en una jaula en que se hallen hembras hambrientas. Todas acudirán a picar la mano humana y ninguna al ave.

Una vez que la hembra haya detectado a un ser humano desde cierta distancia, volará hacia su blanco con algún que otro rodeo. En una jaula de un volumen de 0,3 metros cúbicos, donde se encuentren encerradas hembras hambrientas, cada mosquito suele tardar entre cinco y treinta segundos en posarse sobre la mano humana. Una vez que el mosquito se ha posado sobre la mano, puede dar unos cuantos pasos antes de perforar la piel o bien puede empezar a picar sin ninguna actividad previa. Siempre se puede saber cuándo el mosquito va a efectuar la picadura; en efecto, de repente, levanta el par de órganos sensoriales, que reciben el nombre de palpos maxilares, y que se hallan situados a cada lado de la trompa, hasta formar un ángulo de unos 75 grados.

Para apreciar cabalmente la complejidad



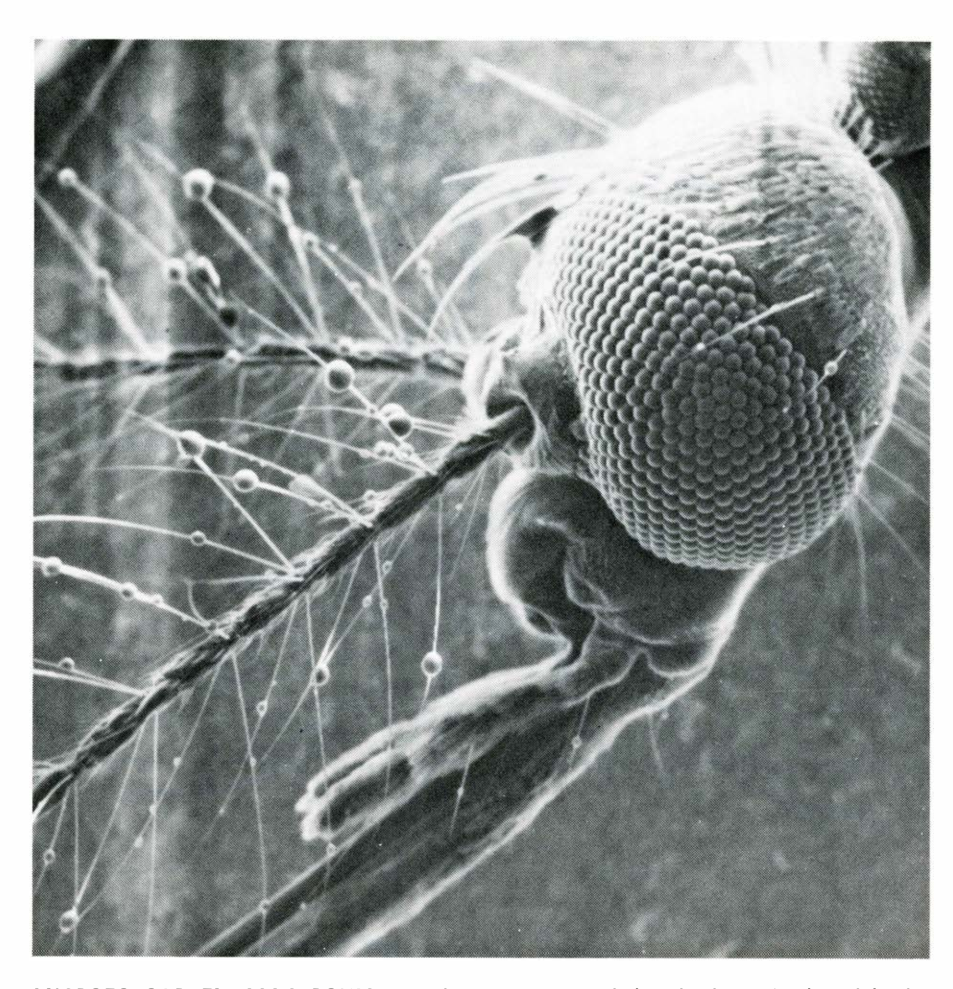
ANATOMIA DEL TUBO DIGESTIVO de una hembra adulta de un mosquito *Aedes*. El mosquito descubre a su presa desde cierta distancia gracias a sus antenas; absorbe zumos azucarados o sangre con la trompa. Los zumos azucarados se dirigen primero al buche; la sangre normalmente no pasa por el buche, sino que va directamente al intestino medio. La trompa está formada por el labium protector, que alberga el haz de estiletes chupadores, llamado fascículo. El fascículo consta del labro, las dos mandíbulas, la hipofaringe y las dos maxilas. El fascículo es, a la vez, el aparato para efectuar la picadura y el tubo por donde se absorbe el alimento. Se muestra aquí abierto y extendido para que se observen bien las partes de que consta; todas estas partes se encajan estrechamente y se alojan en el interior del labium. La anatomía de la trompa del mosquito puede apreciarse con mucho mayor detalle en la ilustración inferior.



ANATOMIA DE LA TROMPA, que muestra cómo todas las partes del fascículo del mosquito encajan perfectamente y se alojan en el interior del labium. El labium es el gran labio inferior escamoso que termina en dos lóbulos sensoriales peludos, denominados labelos. El labium forma un tubo en forma de *U*, en cuyo interior se aloja el fascículo. El fascículo tiene cuatro partes principales: el labro terminado en punta afilada, que forma el extremo superior del fascículo y sirve como canal invertido por el que asciende la sangre chupada; las dos mandíbulas, a modo de escalpelos, que están a los lados; las dos maxilas, que parecen agujas y poseen finos dientes en los extremos que hacen de sierra cortante para sajar la piel de la víctima; y la hipofaringe, que es aplastada y puntiaguda.

de los factores que intervienen en la extracción de la sangre, de la que se alimenta, son necesarios algunos conocimientos sobre la anatomía de la trompa del mosquito y el canal alimentario *(véanse las ilustraciones de la página anterior).* La trompa o probóscide se prolonga perpendicularmente a la cabeza del insecto. Está constituida por el llamado labium, labio inferior grande escamoso y pronunciado, que lleva en el extremo terminal un par de lóbulos vellosos, los labelos. El labium forma un profundo boquete en el que se esconde un paquete de largos y afilados estiletes de color amarillo claro que, en conjunto, integran el fascículo. El estilete más largo lo constituye el afilado labro, que forma un canal invertido por el que pasa la sangre que se ha chupado. A ambos lados del labro hay dos mandíbulas largas y delgadas. Debajo de ellas se encuentran las dos maxilas aciculares, mucho más anchas, con finos dientes en los extremos, en forma de sierra. Bajo éstos, a su vez, encontramos un estilete aplanado, la hipofaringe; subyacente al centro de ésta distinguimos un canal salival simple. El fascículo actúa como mecanismo de perforación y como tubo de aspiración del alimento. El labro forma el techo y las paredes y la hipofaringe el suelo de este tubo. La reunión de labium y fascículo constituye la trompa o probóscide.

El canal alimentario se abre en la bomba cibarial, pequeña y de superficie dura, que se encuentra justo donde empieza la cabeza del mosquito. La bomba del cibario posee varios tipos de receptores. Se ha sugerido que los finos pelos del interior del cibario funcionan como medidores de corriente y que hay otros receptores que indican si el flujo que está entrando en el tubo digestivo es agua azucarada o sangre. La bomba del cibario se abre directamente en la bomba de la faringe, mucho más larga y en forma de perilla, que vierte el flujo en un esófago largo y estrecho que se encuentra en el cuello del mosquito. El esófago desciende hasta el tórax; allí se bifurca en dos pequeños sacos dorsales, de paredes finas, y en un gran saco ventral impar: el buche. El esófago conecta también, a través de una gruesa válvula, con el largo intestino medio del mosquito.

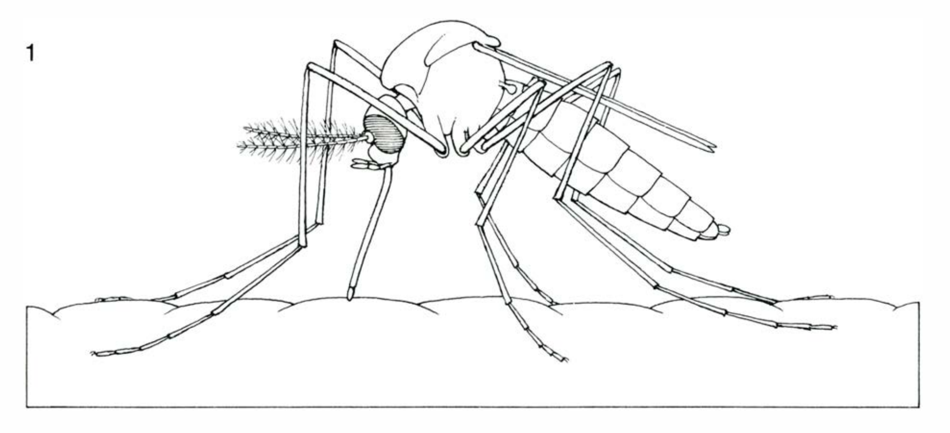


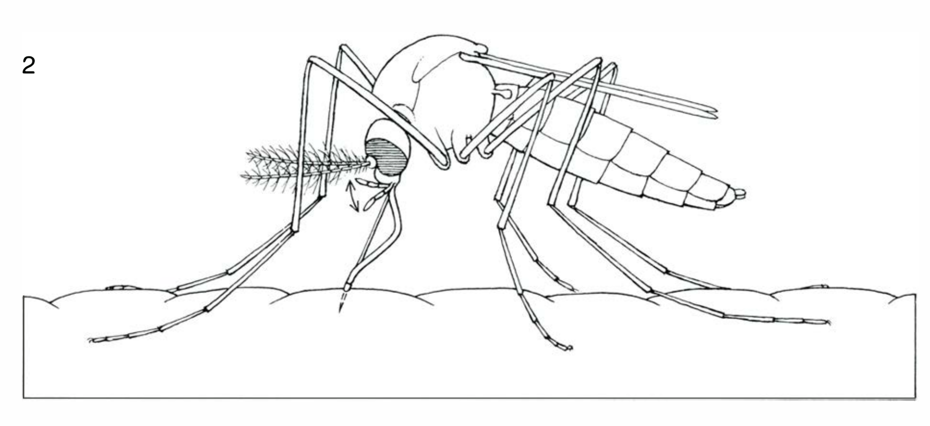
MICROFOTOGRAFIA ELECTRONICA, sacada con microscopio de barrido, de una hembra adulta de mosquito que muestra una visión de detalle de la trompa. Los ojos compuestos del insecto rodean la cabeza; las antenas surgen de la parte frontal de ésta. (Las pequeñas esferas que se encuentran sobre los pelos de las antenas son gotitas de un antiestático aplicado con pulverizador al insecto para facilitar la elaboración de la microfotografía electrónica.) Los palpos maxilares son las dos pequeñas estructuras cubiertas de pelos que están justo encima y a los lados de la trompa, que se sale de la fotografía por el extremo inferior izquierdo. El labium y los labelos de la trompa se distinguen claramente; el fascículo, sin embargo, queda oculto.

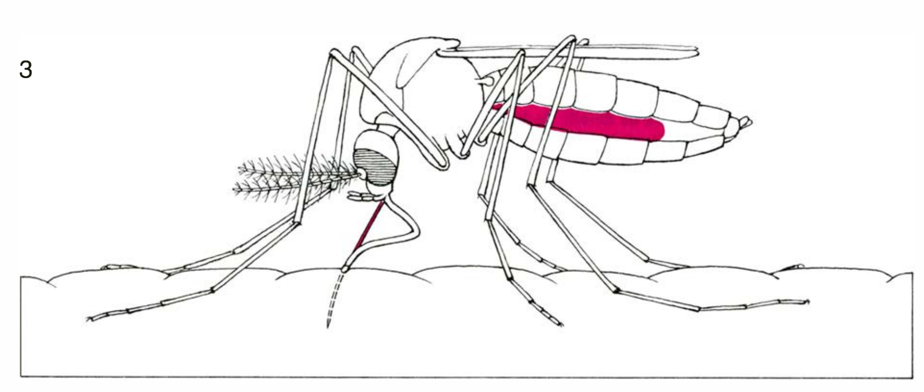
Teniendo presente este esbozo anatómico, volvamos al punto en que el mosquito se ha posado sobre la piel y ha llegado el momento de la picadura. Mantiene las seis patas sobre la superficie de la piel de la víctima, los labelos peludos están rozando la epidermis y tiene los palpos maxilares levantados. Se supone que una vez que el mosquito ha desplegado los labelos, las finas maxilas dentadas del fascículo funcionarán a modo de sierra para abrirse camino a través de la piel, con movimientos extremadamente rápidos de adelante atrás. Pueden verse los palpos maxilares moviéndose de adelante atrás, mientras el fascículo surca en la piel. En esta etapa, el gran labium está doblado hacia atrás, como si fuera una horquilla para sujetar el cabello. La piel se está sajando así, sin que el cuerpo del mosquito intervenga para nada. El fascículo queda clavado en la piel hasta la mitad de su longitud, aproximadamente. Y mientras se está produciendo esta perforación, el mosquito va desplazando sus patas cada vez más cerca de su cuerpo. Tan pronto como la sangre llega al fascículo, los palpos maxilares detienen su actividad.

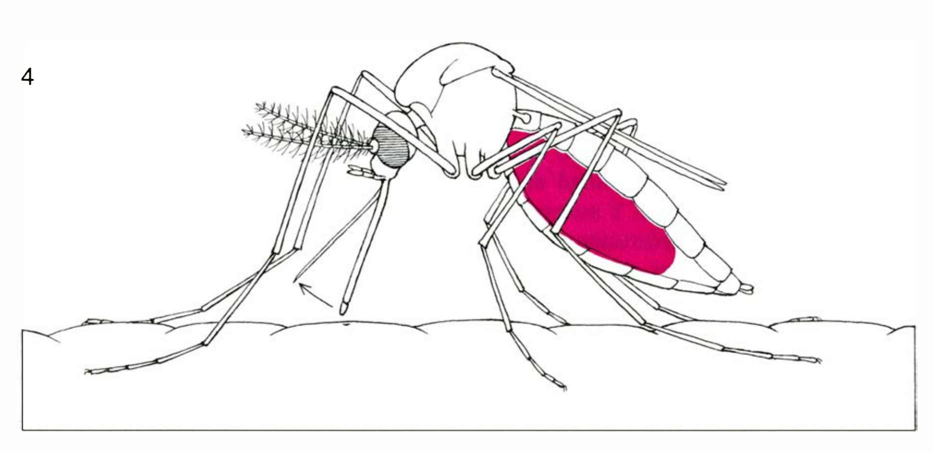
La hembra tarda por término medio unos 50 segundos en clavar el fascículo en la piel humana, y a menos que vea interrumpida su actividad (¡aplastada quizá por un manotazo de la víctima!) normalmente chupa sangre durante unos dos minutos y medio. Cuando el mosquito ha bebido hasta la saciedad, retira el fascículo con bastante rapidez (en unos cinco segundos). Para ello, el insecto endereza sus patas delanteras, se reclina un poco hacia atrás y mueve el labium de un lado a otro. Una vez que el fascículo ya ha salido de la piel, se dispara hacia arriba y hacia adelante y vuelve a su sitio en la profunda entalladura del labium. La operación pudiera recordar al hombre que se dispone a introducir el brazo en la manga del abrigo.

Algunos mosquitos inyectan en la piel saliva que contiene ciertas sustancias que evitan la coagulación de la sangre mientras la van succionando. La saliva sale por el canal salival hasta la hipofaringe. La inyección de saliva no es realmente imprescindible para que el mosquito obtenga sangre: si se corta, a modo de experimento, el canal salivario del cuello antes de permitir que el mosquito se alimente, se observará que el insecto puede todavía extraer sangre sin dificultades aparentes. Los protozoos y los virus transmitidos por los mosquitos se inyectan en la piel con la saliva, pero los gusanos portadores de la malaria, mucho mayores, se arrastran por la trompa y penetran por la abertura de la herida mientras el mosquito está alimentándose.









MOSQUITO ALIMENTANDOSE DE SANGRE HUMANA. Necesita varios minutos para atravesar la piel y efectuar una ingestión completa. Justo antes de atravesar la piel, el mosquito levanta los palpos maxilares formando con la trompa un ángulo de unos 75 grados *(1)*. Las maxilas que contienen finos dientes practican cortes dentro del tejido de la piel, recurriendo a pequeños movimientos hacia adelante y hacia atrás, lo que hace que los palpos también se muevan de adelante atrás. El fascículo se introduce en la piel por entre los labelos. A medida que va penetrando en la piel, el labium se dobla hacia atrás, adoptando la posición de una horquilla del cabello *(2)*; el mosquito extiende entonces las patas a una zona más próxima al cuerpo. Cuando se ha introducido ya la mitad de la longitud del fascículo en la piel, el mosquito empieza a succionar la sangre *(3)*. Una vez lleno el abdomen del mosquito, éste endereza sus patas delanteras para retirar el fascículo, que se sale de la herida *(4)*, para alojarse entonces en la profunda ranura del labium.

Sigue siendo una incógnita el escozor que provoca la picadura. El investigador británico J. D. Gillett descubrió que el picor no se inicia hasta unos tres minutos después de la picadura. Este escozor desaparece como una hora después, pero puede volver a manifestarse en una gran roncha, que a veces dura días. Tanto la reacción inmediata como la diferida son de origen alérgico. La intensidad de las reacciones varía mucho de un individuo a otro, y parece tener que ver con la edad y el sexo de la víctima y con la frecuencia que haya sufrido picaduras. También varía esta intensidad de la reacción en un mismo individuo según el número de picaduras que ha sufrido y según la edad y la especie de mosquito de que se trate; depende también de que el mosquito se haya saciado o bien de que se le haya interrumpido antes. Todos estos aspectos todavía no han sido perfectamente estudiados.

Tal como hemos visto, el mosquito al alimentarse permanece apoyado sobre sus seis patas. Si se le amputan, con fines experimentales, todas las patas, se muestra capaz todavía de revolotear un poco por encima de la piel y de volver a intentar la picadura. Por lo general, el insecto se estrellará y no conseguirá alimentarse. Precisa por lo menos tres patas para orientarse y poder picar. En ciertas ocasiones, sin embargo, un mosquito con menos de tres patas muestra una notable capacidad de improvisación: puede bajar el abdomen y extender un ala a fin de constituir una firme base de apoyo para la picadura.

Robert W. Gwadz, del National Institute of Allergy and Infectious Diseases, ha demostrado que si se corta el sistema nervioso ventral del mosquito entre el tórax y el primer segmento abdominal, el insecto puede continuar sorbiendo hasta saciarse. De hecho, en algunos casos, puede ir succionando hasta que su abdomen llega a reventar, ¡e incluso después! Aun cuando el insecto no reviente, no puede iniciar el vuelo. Rápidamente entra en coma, y muere a las 24 horas. Resulta evidente que el sistema nervioso ventral es el órgano principal que advierte al insecto cuándo ha bebido bastante.

Este cuadro del comportamiento alimentario del mosquito adulto se inicia, pues, con la percepción por parte de sus antenas y ojos de la presencia de comida cerca. El mosquito suele volar hacia la comida y se posa. Los órganos sensoriales de sus pies pueden darle información acerca de la temperatura del alimento o de la concentración de azúcar. Cuando los órganos sensoriales han sido suficientemente estimulados pueden inducir al mosquito a bajar su probóscide. Los pelos del extremo labelar de la probóscide son sensibles al

tacto, al azúcar y quizás a las sales y al ATP. Si los labelos encuentran azúcar, transmiten una respuesta que varía según el tipo de azúcar y su concentración. Cuanto más concentrada esté la solución azucarada, tanto más atraerá al mosquito. Cuando los mosquitos están alimentándose de fruta, a veces clavan completamente la trompa, pero la mayoría de las veces sólo introducen los labelos en la comida (la rozan ligeramente) y probablemente segregan saliva para ayudar a sorber suficiente cantidad de alimento por el tubo de absorción. No acostumbra a replegar el labium hacia atrás cuando se alimenta de fruta. Una excepción a la regla se da si el mosquito come melocotón, cuya piel está cubierta de pelusa. Parece ser que los receptores de la bomba del cibario ayudan a dirigir los fluidos azucarados hacia el buche del insecto.

Cuando los labelos de una *Aedes* hambrienta se afirman sobre un animal de sangre caliente, ésta clava el fascículo y repliega el labium hacia atrás. Seguramente los receptores de la bomba del cibario emiten entonces un mensaje al cerebro del mosquito que hace que la válvula que va al estómago se abra y permita que la sangre llene sólo el intestino medio, sin entrar en el buche. La cantidad de sangre que toma el insecto se controla por el sistema nervioso ventral, a base de dilatar los receptores del abdomen, con lo que la hembra saciada suspende la ingestión y retira el fascículo.

El comportamiento alimentario de los mosquitos varía notablemente de unas especies a otras. El comportamiento de alimentación del peligroso mosquito *Aedes aegypti* es muchísimo mejor conocido que el de cualquier otra especie, incluyendo también al mosquito común de las casas *(Culex),* principalmente porque el *Aedes aegypti* reacciona con rapidez y uniformemente frente al hombre. Muchas otras especies reaccionan con lentitud. Las costumbres alimentarias del mosquito común en cautividad son tan excéntricas que resultan de difícil y frustrante estudio. Cuando se confinan hembras de *Culex* en una jaula, sólo algunas de ellas, con esfuerzo, se posarán sobre la piel humana y muy pocas llegarán a picar. Las hembras de algunas estirpes no tomarán sangre en cautividad ni aun cuando vayan a morir de inanición.

Queda mucho trabajo por hacer para completar el panorama que nos representa el comportamiento alimentario de los mosquitos, así como para configurar un esquema de conocimientos que nos permitan salir al paso de las molestias que causan y prevenir la difusión de las enfermedades que acarrean.

Juegos matemáticos

Un parque zoológico matemático en donde habitan ciertas criaturas increíbles; imaginarias unas, otras no

Martin Gardner

Nunca se ha proyectado un zoológico destinado a la exhibición de animales interesantes en matemática recreativa; y, sin embargo, un tal zoo sería tan entretenido como instructivo. Tal como yo lo concibo, debería constar de dos alas principales, una reservada a animales vivos y la otra, para imágenes, reproducciones y dibujos animados de seres imaginarios. Para tener siempre al corriente a socios y aficionados se editaría (con autorización de la Sociedad Zoológica de San Diego, que tiene una publicación periódica del mismo nombre) un boletín llamado ZOONOOZ, título que además de ser palindrómico permanece invariable al invertirlo.

Una de las salas del ala de animales vivos habría de disponer de microscopios con los que observar organismos que, por demasiado minúsculos, no podrían observarse de otra forma. Tomemos las increíbles simetrías de los radiolarios, seres unicelulares que medran en el mar. Sus intrincados esqueletos silíceos son contrapunto biológico de los delicados motivos de los cristales de nieve. El biólogo alemán Ernst Haeckel, en su *Monograph of the Challenger Radiolaria,* describió miles de especies de radiolarios por él descubiertas en la expedición del *Challenger* de 1872-1876. El libro contiene 140 láminas de dibujos que revelan las peculiaridades geométricas de estas bellas e intrincadas formas con perfección que todavía no ha sido superada.

La ilustración de la página siguiente, extraída del libro de Haeckel, tiene para los matemáticos un interés especial. La forma del primer radiolario es, sustancialmente, esférica, pero sus seis prolongaciones en forma de uña definen los vértices de un octaedro regular. El segundo esqueleto tiene en su centro este mismo sólido. El tercero es un icosaedro regular, con 20 caras. El quinto es un dodecaedro, con 12 caras. Otras láminas del libro de Haeckel muestran radiolarios de formas aproximadamente cúbicas o tetraédricas.

Todo el mundo sabe que hay exactamente cinco sólidos platónicos, y que, de ellos, tres tienen caras que son triángulos equiláteros. Sin embargo, ya no es tan conocido que existe una infinidad de sólidos semirregulares cuyas caras son también triángulos equiláteros. Se llaman "deltaedros", porque sus caras se asemejan a la letra griega "delta". Solamente hay ocho deltaedros convexos: los de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 20 caras. El ausente de la serie, que tendría 18 caras, es muy misterioso. Casi puede demostrarse que tendría que existir, y en cambio, no es tan fácil demostrar que no puede haber ninguno. Cuesta creerlo, pero la demostración de que solamente existen ocho deltaedros convexos no fue conocida hasta 1947, año en que fue publicada por B. L. van der Waerden y Hans Freudenthal.

El deltaedro de cuatro caras es el tetraedro regular, el más sencillo de los cuerpos platónicos. El deltaedro de seis caras está formado por dos tetraedros que comparten una cara en común. Obsérvese el cuarto radiolario de la figura de Haeckel. Es un deltaedro de 10 caras, aunque ligeramente inflado, asemejándose a una esfera. Quizá le sorprenda saber que hay dos deltaedros de ocho caras topológicamente distintos. Uno de ellos es el conocido octaedro regular. ¿Sabría el lector construir un modelo del otro (no es convexo) antes que aparezca resuelto el mes próximo en esta misma sección?

La superficie de los radiolarios suele estar cubierta por lo que parece ser una red de hexágonos regulares. Tal regularidad es particularmente llamativa en *Aulonia hexagona,* que se muestra en la página 96. Se dice que estas redes son "mapas regulares" cuando todas las celdillas tienen igual número de lados y en todos los vértices se reúnen el mismo número de lados. Imaginemos que un tetraedro, octaedro o icosaedro se inflase como un globo, aunque respetando sobre la esfera resultante las trazas correspondientes a las primitivas aristas. El tetraedro originará un mapa regular de regiones triangulares en el que cada vértice es punto de confluencia de tres vértices; el octaedro, un mapa de triángulos con cuatro lados concurriendo en cada vértice; y el icosaedro, un mapa de triángulos en el que cada vértice recibe cinco lados. Al inflar un cubo se obtiene un mapa regular de células cuadriláteras, en el que concurren tres lados en cada vértice. Al inflar un dodecaedro resulta un mapa regular de pentágonos, con tres lados en cada vértice.

Aulonia hexagona suscita una interesante cuestión. ¿Es posible recubrir una esfera con un mapa regular de hexágonos en el que concurran tres lados en cada vértice? Solamente nos interesan las propiedades topológicas del mapa. Los hexágonos no tienen por qué ser regulares y, ni siquiera, convexos. Pueden tener cualquier forma y tamaño, y sus lados curvarse y retorcerse a voluntad con tal de que no se corten a sí mismos, ni tampoco unos a otros, y que en cada vértice se reúnan tres de ellos.

La cuestión anterior tiene respuesta negativa. No es difícil demostrar la imposibilidad de tal mapa utilizando una fórmula descubierta por Euler, válida para los esqueletos de todos los poliedros simplemente conexos (sin "agujeros"). Dicha fórmula establece que $C + V - L = 2$, donde C representa el número de caras del poliedro, L el de aristas y V el de vértices. Puesto que todos los poliedros simplemente conexos pueden inflarse dando esferas, la fórmula es también válida para mapas trazados sobre una superficie esférica. En el Capítulo 13 de *The Enjoyment of Mathematics* (trad. esp. *Números y Figuras,* Alianza Editorial, S.A., 1970) se encontrará explicado con detalle que no se pueden trazar sobre la esfera más de cinco mapas regulares topológicamente distintos, y que, por consiguiente, no pueden existir más de cinco sólidos regulares convexos. Como segundo problema, que se resolverá el mes próximo, ¿podría el lector demostrar que es imposible trazar un mapa regular de hexágonos sobre una esfera?

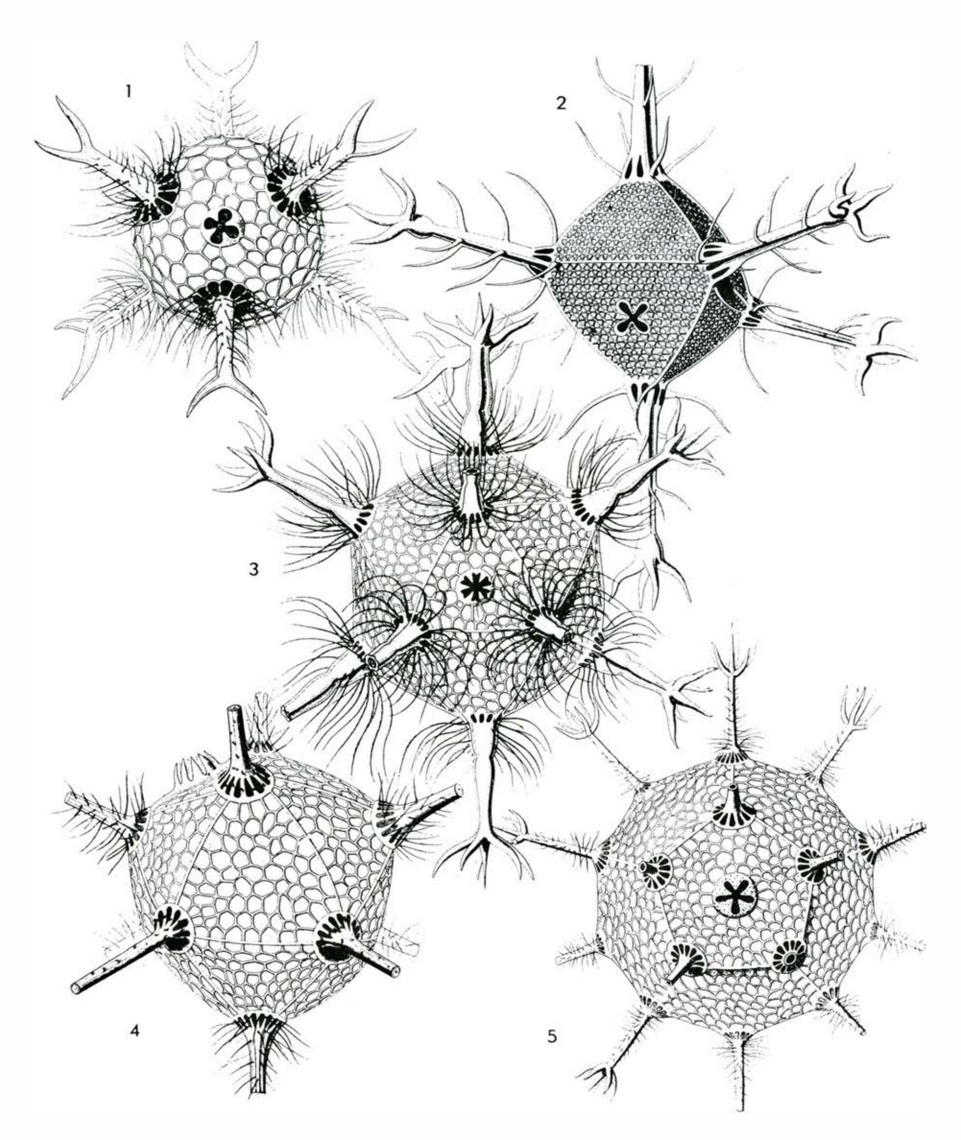
A D'Arcy Wentworth Thompson, cuya clásica obra *On Growth and Form* contiene una excelente sección dedicada a los radiolarios, le gustaba referir una anécdota sobre un biólogo que afirmaba haber visto

un radiolario esférico cubierto con un mapa hexagonal perfecto. Pero, le objetó Thompson, Euler ha demostrado que eso es imposible. "Pues entonces", retrucó el biólogo, "está clara la superioridad de Dios sobre las matemáticas".

"El caso es que la demostración de Euler resultó ser correcta, y las observaciones, inexactas", escribe Warren S. McCulloch en un artículo del cual he extraído esta anécdota. "De haber sido ambas correctas, lejos de demostrar la superioridad de Dios sobre la lógica, hubieran puesto en tela de juicio su cordura, al descubrirle en contradicción." Si se examina con cuidado el dibujo de *Aulonia hexagona* se observará que muchas celdillas tienen más o menos de seis lados.

Observados al microscopio electrónico de la sala "micro" de nuestro zoológico encontraríamos muchos virus que, como se ha descubierto recientemente, cristalizan en macromoléculas con forma icosaédrica: los virus del sarampión, los herpes, la triola iridiscente y otros muchos (véase "The Structure of Viruses", por R. W. Horne; *Scientific American,* enero de 1963). Los virus podrían tener también formas dodecaédricas, pero, que yo sepa, la cuestión no está todavía completamente elucidada. Otro reciente descubrimiento ha mostrado que ciertos virus, como el causante de las paperas, son helicoidales. Se creía antes que solamente existían estructuras helicoidales en las plantas y en ciertas partes del cuerpo de los animales: el pelo, el cordón umbilical, la clóquea del oído interno humano, la molécula de ADN y algunos otros. Una sección de nuestro zoológico exhibiría estructuras helicoidales tan espectaculares como las conchas de caracoles y moluscos marinos, las retorcidas defensas de ciertas ovejas, cabras, antílopes y otros mamíferos y curiosidades como "sacacorchos del diablo" –enormes madrigueras fósiles de una especie de castores ya extinta (véase el Capítulo 1, "La hélice", de mi *Sixth Book of Mathematical Games from Scientific American*).

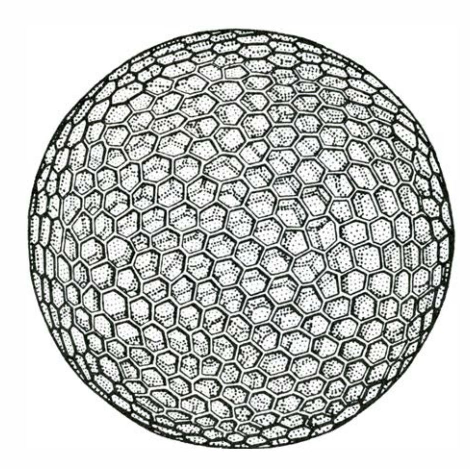
En el mundo macroscópico de peces, reptiles, pájaros, insectos, mamíferos y seres humanos, la más destacada característica del cuerpo es su simetría bilateral general. No es difícil comprender cómo llegó a producirse este fenómeno evolutivo. Sobre la superficie terrestre, la gravedad establece una marcada diferencia entre arriba y abajo, y la locomoción crea la diferencia entre delante y detrás. Mas para cualquier criatura móvil y vertical, los lados izquierdo y derecho de su derredor –en tierra, en el mar o en el aire– son fundamentalmente iguales. Dado que un animal necesita ver, oír, oler y manipular el mundo igualmente bien por ambos costados, tener lados izquierdo y derecho sustancialmente iguales constituye un evidente valor de supervivencia.



Esqueletos de radiolarios tomados de **Monograph of the Challenger Radiolaria,** *escrita por Ernst Haeckel*

En nuestro matezoo no interesan los animales con simetría bilateral –que pueden contemplarse en cualquier zoo ordinario–, pero en cambio sería divertido montar una exposición de las más extravagantes violaciones de la ley de simetría. Por ejemplo, en el aviario se podría mostrar el piquituerto, un pajarillo rojo de la familia de los fringílidos (jilgueros, pinzones, etcétera), cuyas mandíbulas superior e inferior se cruzan una sobre la otra de cualquiera de los dos modos posibles. El pájaro se sirve de su pico tuerto para forzar a abrirse las piñas de las coníferas de forma análoga a como el cocinero usa el abrelatas para abrir un envase. Según una leyenda medieval, el pájaro se torció el pico intentando en vano desclavar los clavos de la cruz cuando Jesucristo fue crucificado; en el esfuerzo se manchó las plumas de sangre. En el mismo aviario podrían encontrarse también algunos chorlitos de pico torcido de Nueva Zelanda. Las dos mandíbulas de este curioso animal están torcidas hacia su derecha. El pico sirve para dar la vuelta a piedras, bajo las cuales halla su alimento. Como podría suponerse, estos chorlitos neozelandeses tienen tendencia a irse hacia la derecha al buscar alimento.

El acuario de nuestro matezoo podría mostrar análogos ejemplos de ridículas asimetrías en la vida marina. Por ejemplo, el macho del cangrejo de mar suele tener una de sus pinzas mucho más desarrollada que la otra. Rodaballos, lenguados y otros pleuronectos son ejemplos más grotescos todavía. Los individuos jóvenes tienen simetría bilateral, pero conforme crecen va emigrando lentamente uno de sus ojos por encima de la cabeza, hacia el otro lado. El pobre animal, que recuerda una cara de Picasso, se hunde hasta el fondo, donde yace en el fango sobre su costado ciego. Los ojos, situados ahora en la parte superior, giran independientemente uno de otro, pudiendo mirar continuamente en direcciones diferentes.



El radiolario **Aulonia hexagona**

En otro tanque podrían mostrarse ejemplares de lamprea glutinosa. Este absurdo pez, de aspecto anguiliforme, tiene cuatro corazones y dientes en la lengua, y se reproduce por algún procedimiento que todavía es misterioso. Cuando se obstruye su única ventana nasal, estornuda. El motivo de encontrarse está en su prodigiosa habilidad para hacerse un nudo medio, que puede lo mismo ser dextrorsum que sinistrorsum. Haciendo correr el nudo desde la cola hasta la cabeza, el animal consigue desprenderse del limo adherido a su cuerpo. También utiliza esta habilidad para anudarse con el fin de hacer más fuerza cuando arranca un bocado de algún gran pez muerto, o para escapar de sus depredadores (véase "The Hagfish", por David Jensen, *Scientific American*, febrero de 1966).

Evidentemente, el estudio matemático de los nudos corresponde a una rama de la topología. Otra de las muestras de nuestro acuario serían cubetas llenas de *Leucothrix mucor*, una bacteria marina con forma de largo filamento. Enfrente de cada cubeta una lupa permitiría que los visitantes observasen los endebles filamentos. Se reproducen haciéndose un nudo –nudos medios, nudos cruzados simples en forma de ocho, e incluso otros más complicados– que apretándose más y más llegan a romper el filamento en dos o más partes (véase "Knots in *Leucothrix Mucor*", por Thomas D. Brock; *Science*, vol. 144, págs., 870-871; 15 de mayo de 1964). ¿Hay animales superiores que anuden partes de su cuerpo? Lo mejor será que se cruce de brazos y lo piense.

Quizá la más visitada de las muestras de nuestro acuario fuera un tanque que contuviera especímenes de *Anableps*, pequeña carpa (unos veinte centímetros) de América Central, que los ictiólogos llaman a veces uranoscópido. Parece como si tuviera cuatro ojos. Cada uno de sus dos saltones ojos está dividido por una banda opaca, dejando una parte superior y otra inferior. El ojo tiene un solo cristalino, pero en cambio posee dos córneas y dos iris. Este pequeño MOS (monstruo de ojos saltones) nada con la membrana de separación ocular a ras de agua. Dos ojos, los superiores, ven lo situado por encima del agua; los inferiores hacen lo mismo por debajo. El *Anableps* figura en nuestro zoo en razón de su asimétrica vida sexual. Existe viviparismo, lo que implica que el macho ha de fertilizar los huevos que la hembra porta en sus entrañas. La abertura sexual de la hembra puede hallarse en el costado derecho o en el izquierdo. Asimismo, el órgano masculino puede hallarse de uno u otro lado. Por esta razón, dos peces "de la misma mano" no pueden aparearse. Afortunadamente, hay las mismas proporciones de machos y hembras con el sexo de cada lado; por consiguiente, la especie no corre peligro alguno de extinción.

En tanques de mayor tamaño podríamos esperar ver algunos narvales, aunque hasta ahora no ha sobrevivido ninguno en cautividad. Esta pequeña ballena, procedente de los mares nórdicos circumpolares, ha sido llamada "unicornio marino", debido a que el macho tiene un único "cuerno" que se proyecta hacia delante de su mandíbula superior, con longitud aproximadamente la mitad del cuerpo del animal. Ambos sexos nacen con dos pequeños caninos, uno a cada lado. En la hembra estos dientes se mantienen de pequeño tamaño, pero en el macho el canino izquierdo se convierte en auténtico colmillo de marfil, recto como una jabalina, que llega a medir de dos a tres metros de largo. Este ridículo diente, el más largo del mundo, tiene una estría helicoidal que lo va rodeando, como la barra de anuncio de una barbería. Nadie sabe qué función realiza el colmillo. Ni lo utiliza para atravesar a sus enemigos ni para perforar orificios en el hielo, si bien durante la época de apareamiento se han visto narvales realizando con él una especie de encuentro de esgrima, así que quizá tenga algún papel en los ritos sexuales (véase "The Horn of the Unicorn", por John Tyler Bonner; *Scientific American*, marzo de 1951). Casualmente, el narval es también excepcional en que su nombre comienza por la letra *n*. Con excepción de la *n*, no es difícil encontrar nombres de mamíferos que comiencen por las restantes letras del alfabeto.

Entre las serpientes, las especies que habitan en el desierto son matemáticamente interesantes por lo muy asimétrico de sus huellas en la arena: sistemas de segmentos de rectas paralelas que se inclinan a derecha e izquierda con ángulos de casi 60 grados respecto de la dirección de avance. Muchas especies de serpientes son capaces de reptar de esta forma, muy especialmente el crótalo, una pequeña cascabel que abunda en México y en el sudoeste de los Estados Unidos, y la víbora del desierto africano. El procedimiento de serpeo es bastante complicado, pero puede verse una explicación muy clara en el artículo de Carl Gans "How Snakes Move", en *Scientific American* de junio de 1970.

Evidentemente, en la sala de insectos de nuestro zoo matemático habrían forzosamente de exhibirse los panales de las abejas y los nidos de avispas sociales, que muestran una teselación hexagonal todavía más regular que la de los radiolarios. Abundante literatura, que se remonta hasta la Grecia antigua, y que sigue hoy creciendo intenta explicar las causas determinantes de esta estructura. D'Arcy Thompson, en el libro arriba mencionado, da un buen resumen de toda esa literatura. En la época anterior a Darwin se consideraba que las abejas habían sido dotadas por el Creador de la habilidad necesaria para producir nidos cuyas celdillas, consumiendo la mínima cantidad de cera, contuvieran el máximo de miel. Incluso Darwin se maravilló al apreciar la habilidad de la abeja en la construcción de panales, habilidad que describió como "el más maravilloso de los instintos conocidos" y como "absolutamente perfecto por su economía de trabajo y cera".

Los panales reales no son tan perfectos como los primeros autores quisieron hacernos ver, y además, existen métodos de teselación del espacio mediante celdillas poliédricas que permiten todavía mayor economía de cera. Además, parece verosímil que la estructura del panal sea en menor proporción resultado de que la evolución haya proporcionado un método de economizar cera que resultado accidental de la forma tan densa en que se apiñan las abejas al trabajar y del uso que hacen de su cuerpo. Puede que influya también la tensión superficial de la cera semilíquida. La cuestión todavía está lejos de quedar definitivamente resuelta. El mejor análisis reciente sobre este tema de que tengo noticia se debe al matemático húngaro L. Fejes Tóth, en un artículo titulado "What the Bees Know and What They Do Not Know" (Lo que saben y lo que no saben las abejas), aparecido en el *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 70, páginas 468-471; julio de 1964.

No existe ningún animal de la naturaleza que se impulse sobre el suelo rodando como un disco o una esfera, pero nuestra sala de insectos quedaría ciertamente incompleta sin mostrar un notable insecto que transporta su comida haciéndola rodar en esferas casi perfectas. Me estoy refi-

riendo al escarabajo pelotero, el escarabajo sagrado del antiguo Egipto. Estos insectos, a veces muy bellos (en los trópicos tienen brillantes coloridos metálicos), utilizan sus cabezas, planas y de afilados bordes, como palas con las que excavan una nueva provisión de estiércol, que después apelotonan y redondean con las patas delanteras. Empujando con sus patas traseras y caminando hacia atrás, el escarabajo pelotero consigue hacer rodar la bolita hasta su guarida, donde le servirá de alimento. Nadie ha descrito el proceso con mayor habilidad literaria y humorística que el entomólogo francés Jean Henri Fabre, en su ensayo "El escarabajo sagrado".

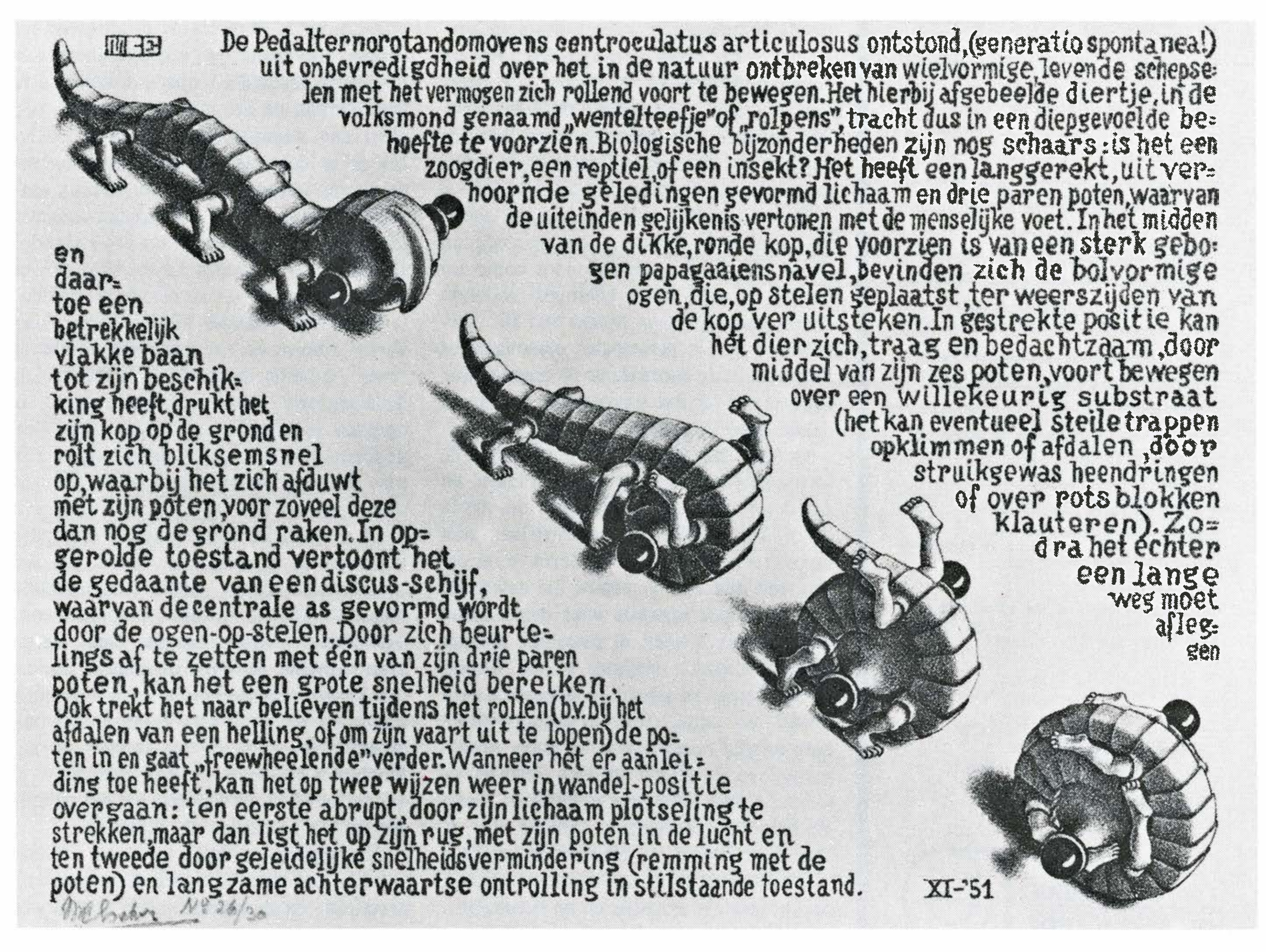
En nuestro zoo, el ala destinada a seres imaginarios carecería de la animación y movimiento de los seres vivos, pero los supliría con fantasía desbordante. En *Las tentaciones de San Antonio,* de Flaubert, hay una bestia llamada Nasnas que es la mitad de un animal cortado longitudinalmente a largo de su plano de simetría. Jorge Luis Borges, en su delicioso *El libro de los seres imaginarios* (Kier, Buenos Aires, 1967) menciona que una tal criatura fue ya inventada por los árabes. Una obra de carácter fantástico de L. Frank Baum, *Dot and Tot of Merryland,* nos habla de un valle habitado por animales mecánicos. El encargado de dar cuerda a los juguetes es un tal señor Split (señor Partido), cuya mitad izquierda es de color rojo subido, y su mitad derecha, blanca. Dicho personaje puede desengancharse en dos mitades, cada una de las cuales puede avanzar saltando "a la pata coja" sobre su única pierna, con lo que puede dar cuerda al doble de juguetes que si permaneciera unido. No es muy fácil conversar con una de las mitades del señor Split porque el señor Left Split (señor Partido Izquierdo) solamente se encarga de pronunciar la mitad izquierda de cada palabra, y el señor Right Split, solamente se encarga de la mitad derecha.

Toda una variedad de míticas bestias palindrómicas violan la asimetría de adelante atrás, y tienen extremos idénticos. Borges nos habla de la legendaria *amphisbaena* (del griego, que va en ambos sentidos), una serpiente que tiene una cabeza en cada extremo. Dante sitúa esta serpiente en el séptimo círculo del Infierno, y en el *Paraíso perdido* de Milton, algunos de los demonios de Satán son convertidos en *amphisbaenae.* Alexander Pope escribe en su *Dunciad*:

Thus Amphisbaena (I have read)
At either end assails;
None knows whichs leads,
or which is led,
For both Heads are but Tails.

[Así pues, la amphisbaena
(lo se, lo he leído)
por cada extremo ataca.
No es sabido cuál manda,
ni cuál es conducido.
Pues colas son
al par que son cabezas.

La fábula no carece de justificación. Existen auténticas serpientes llamadas amphisbaenae que pueden reptar en ambos sentidos, y cuyos ojos son tan pequeños que es difícil distinguir un extremo del otro. Si se corta la cabeza de una planaria, al animal le crece otra en la base de la ca-



El rizo, imaginario animal creado por M. C. Escher, puede rodar como una rueda cuando lo desea

beza seccionada; así pues, podrían existir animales palindrómicos en la realidad. En el libro de Baum, *John Dough and the Cherub,* nos encontramos a Duo, que es un perro con cabeza y patas delanteras en cada extremo. Este animal es precursor del Pushmi-Pullyu (Empújame-Tiroyó), que tiene una cabeza bicorne en cada extremo, y que se cría en la jungla africana de los libros del doctor Dolittle, creados por Hugh Lofting.

Los paralelepípedos rectangulares nunca forman parte de ningún animal real, pero en el libro de Baum, *Patchwork Girl of Oz,* hay una criatura de color azul obscuro, gruesa piel y cabeza cuadrada llamada Woozy. Cabeza, cuerpo, piernas y cola del animal tienen forma de bloque. Este ser es amigable en tanto que nadie pronuncie "Krizzle-kroo", pues esto lo irrita tanto que lanza fuego por los ojos. Nadie, y menos que nadie los Woozy, conocen el significado de Krizzle-kroo, y eso es precisamente lo que los exaspera. Borges nos recuerda la existencia del Gillygoo, pájaro perteneciente a la mitología de Paul Bunyan, que anida en empinadas pendientes y pone huevos cúbicos, que no rodarán pendiente abajo, rompiéndose. Los leñadores de Minnesota los cuecen hasta endurecerlos y los usan como dados. En un cuento de Stanley G. Weinbaum, "A Martian Odyssey", una especie de indescriptibles animales marcianos excretan ladrillos de sílice que después utilizan ellos mismos para construirse moradas piramidales.

Baum concibió también criaturas esféricas. Los Roly-Rogues, que aparecen en *Queen Zixi of Ix,* son redondos como un balón, y atacan a sus enemigos rodando contra ellos. En *John Dough and the Cherub* uno de los principales personajes es Para Bruin, un enorme oso de goma al que le gusta convertirse en pelota de goma e ir dando botes por ahí.

Borges, escribiendo sobre animales de forma esférica, nos cuenta que Platón, en *Las leyes,* formula la conjetura de que la tierra, los planetas y las estrellas están vivos. La noción de que la tierra es un organismo que vive y respira fue defendida más tarde por místicos tales como Giordano Bruno, Kepler, el psicólogo alemán Gustav Theodor Fechner y por Rudolf Steiner (quien se separó de la teosofía para fundar un culto rival, la antroposofía). Esta misma noción juega un papel fundamental en la trama de una historia de Conan Doyle, referente al profesor George Edward Challenger, famoso por la obra *Lost World.* Al perforar el profesor Challenger un profundo agujero a través de la epidermis terrestre, en un cuento titulado "When the Earth Screamed" (Cuando la tierra gritó), el planeta aúlla de dolor.

Ruedas giratorias y hélices son mecanismos corrientemente utilizados para propulsar por tierra, mar o aire vehículos manufacturados por el hombre, pero hasta hace poco se suponía que la evolución había sido incapaz de aplicar dispositivos rotativos en la propulsión de los seres vivos. Hace unos cuantos años los biólogos descubrieron con gran sorpresa que los flagelos de las bacterias giran como verdaderas hélices (véase "How Bacteria Swim", por Howard C. Berg; *Scientific American,* agosto de 1975).

También el ala de seres imaginarios de nuestro zoo exhibiría dos de las criaturas de Baum que utilizan ruedas para desplazarse. En *Ozma of Oz,* Dorothy tiene un desagradable encuentro con los Wheelers, raza de fieros humanoides de cuatro patas, que tienen ruedas en lugar de pies. En *The Patchwork Girl of Oz* nos enteramos de la existencia del Ork, enorme pájaro que lleva una hélice en el extremo de la cola. La hélice puede girar en los dos sentidos, lo que permite al pájaro volar hacia delante o hacia atrás.

Solamente conozco dos seres imaginarios que se arrollen en forma de rueda y se desplacen rodando por el suelo. De vez en cuando, en la mayoría de los lugares del mundo hay gente que afirma haber visto "culebras-pescadilla", que mordiéndose la cola forman un aro y ruedan después por el terreno. Algunas culebras, como la culebra de la leche, se mueven formando con su cuerpo grandes espiras verticales y empujando hacia delante tan rápidamente que crean la ilusión óptica de un aro rodando. Quizás estos animales hayan sido origen de las fábulas de las serpientes-pescadilla.

El artista holandés M. C. Escher hizo varios dibujos en los que representaba el "rizo", la bestia mostrada en la ilustración de la página 97. Este improbable animal se desplaza lentamente sobre seis piececillos de forma humana, pero cuando necesita ir más de prisa se hace un ovillo y rueda como un aro.

La mayoría de los animales, y muy particularmente el gusano de tierra, pueden considerarse como seres fundamentalmente toroidales, –forma topológicamente equivalente a una rosquilla. Debe haber gran cantidad de seres de ciencia ficción con formas tóricas, pero en este momento solamente recuerdo uno, el pez anular ondulante, que flota en los canales de las *Martian Chronicles* de Ray Bradbury, y que se cierra como la pupila del ojo alrededor de las partículas de alimento.

Los topólogos saben que un toro puede volverse del revés a través de un agujero practicado en su superficie. En la zoología terrestre no se encuentra situación paralela, pero sí existe un organismo esférico

llamado volvox que se vuelve verdaderamente del revés a través de un orificio. Es una extraña colonia, que habita en lagunas de agua dulce, formada por cientos de células flageladas, aglutinadas en una masa esférica de aspecto gelatinoso que va girando conforme se mueve dentro del agua. El volvox es uno de esos seres situados en la difusa zona entre animal y planta, que podría ser calificado de planta verde (pues obtiene su sustento por fotosíntesis) y de animal (pues se desplaza libremente). No menos difícil resulta decidir si se trata de una colonia o de un único organismo.

Las colonias jóvenes de volvox crecen dentro de la esfera madre, pero sus células tienen los extremos flagelados dirigidos hacia dentro. En el lugar por donde cada esfera infantil está unida al interior de la madre hay en la esfera infantil un pequeño orificio. Al alcanzar la esfera hija cierto tamaño, se separa de la madre y se sale, volviéndose del revés, a través del agujero. Rápidamente brotan flagelos en los extremos de las células, que ahora apuntan hacia fuera, y la recién nacida colonia comienza a girar sobre sí misma en el interior de la madre. La madre acaba muriendo y cuarteándose, dejando escapar a su prole, lo que constituye uno de los más tempranos ejemplos dentro del árbol de la evolución de muerte no accidental (véase "Volvox: A Colony of Cells", por John Tyler Bonner; *Scientific American,* mayo de 1950).

Podríamos haber comentado el volvox mucho antes, pero lo reservé hasta ahora con el fin de presentar el ta-ta, animal mítico aunque mucho más complejo, capaz también de volverse del revés. Fue inventado por Sidney H. Sime, artista inglés que tan maravillosamente ilustró las fantasías de Lord Dunsany. Sime describió y dibujó el ta-ta en su único libro, *Bogey Beasts,* rara colección de versos originales adaptados a música:

The Ta-Ta

There is a cosy Kitchen
Inside his roomy head
Also a tiny bedroom
In which he goes to bed.

So when his walk is ended
And he no more would roam
Inside out he turns himself
To find himself at Home.

He cleared away his brain stuff
Got pots and pans galore!
Sofas, chairs, and tables.
And carpets for the floor.

He found his brains were useless;
As many others would
If they but tried to use them
A great unlikelihood.

He pays no rent, no taxes
No use has he for pelf
Infested not with servants
He plays with work himself.

And when his chores are ended
And he would walk about,
Outside in he turns himself
To get himself turned out.

[Cabe una linda cocina
en su espaciosa cabeza,
y también, un dormitorio
donde dormir su pereza.

Terminado su paseo,
con volverse del revés,
lo de afuera para adentro
y ya está en casa, ¿lo ves?

Su sesera vació de fruslerías.
Platos, ollas y sartenes por doquier!
¡Fuera sofás, alfombras y butacas!
¡Fuera sillas y mesas de comer!

Descubrió que su cerebro
para nada le servía,
lo mismo que muchos otros:
al querer usarlo un día.

Ni necesita criados,
ni precisa pasta gansa.
Todo, todo lo hace solo.
No paga impuestos ni casa.

Si al terminar sus tareas
desea darse una vuelta,
mete adentro el exterior...
¡y él mismo se da la vuelta!]

El mes pasado se les pedía a los lectores que contasen el número de formas de conectar seis puntos rotulados, trazando líneas de acuerdo con ciertas reglas. Un punto aislado puede considerarse como un subconjunto de únicamente un elemento, un par de puntos enlazados, como un subconjunto de dos elementos, tres puntos interconectados, como un subconjunto de tres elementos, etcétera. Así pues, cada posible configuración equivale a una partición del conjunto en subconjuntos disjuntos.

Como el número de tales descomposiciones viene dada por los números de Bell, el número de configuraciones correspondientes a seis puntos es el sexto número de Bell, que es 203. En general, el número de configuraciones correspondientes a n puntos es el n-ésimo número de Bell.

Taller y laboratorio

¿Qué mecanismo explica la posibilidad de flotación de gotas en su propio medio?

Jearl Walker

El difunto C. L. Stong presentó dos veces en la sección "The Amateur Scientist" de *Scientific American*, experimentos relacionados con el curioso fenómeno de las gotas que resbalan por la superficie del agua durante varios segundos antes de hundirse en el líquido. Quizás el lector ha observado este fenómeno en una máquina automática de café cuando el agua gotea desde el filtro hasta el recipiente de cristal.

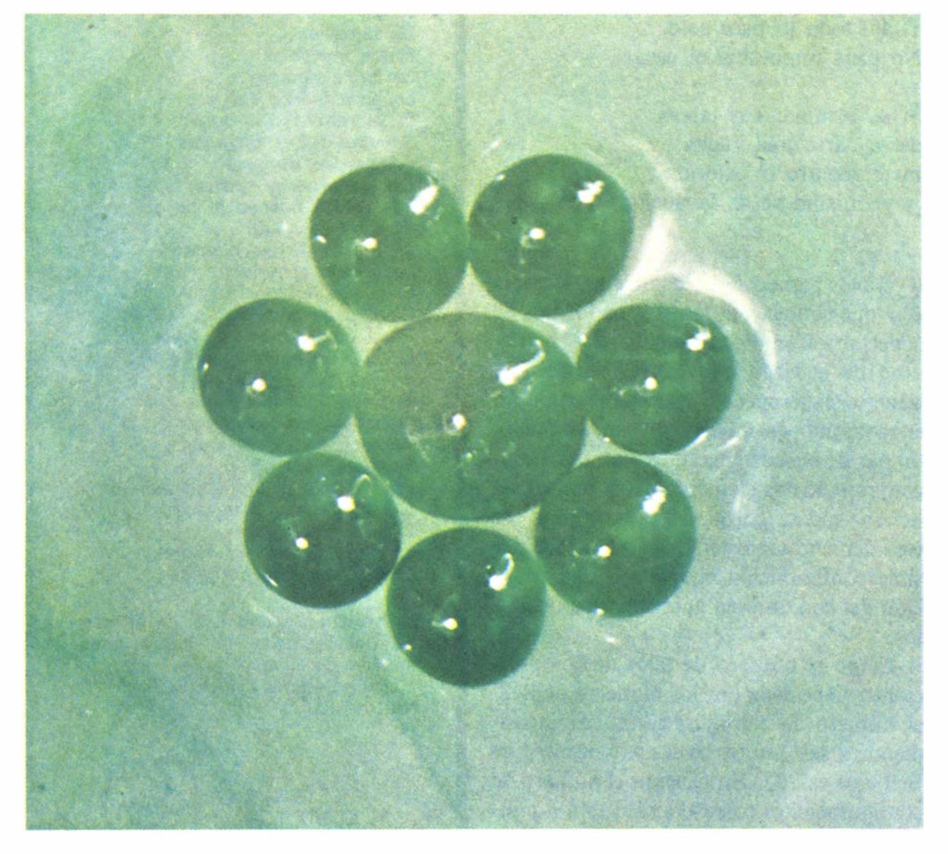
En el primero de los trabajos de Stong (agosto de 1973) Gerard Schol describió un aparato para estudiar las gotas y argumentaba que éstas no se hundían, debido probablemente a la fuerza provocada por la repulsión eléctrica entre la parte inferior de la gota y la masa de líquido situado justo debajo de la misma. En el segundo trabajo (abril de 1974) Kenneth C. D. Hickman experimentaba con algunos casos un poco diferentes: gotas de agua llamadas antiburbujas que flotaban en el agua ligeramente sobrecalentada. Para mí las antiburbujas eran más fáciles de entender que las gotas descritas por Schol, ya que un líquido sobrecalentado tiene una gran tendencia a la evaporación, lo cual provoca la aparición de una capa de vapor por debajo de la antiburbuja, que es lo que la sostiene. Un mecanismo similar mantiene a las gotas de agua encima de un plato caliente en el fenómeno de Leidenfrost, que describimos en esta sección el pasado octubre.

El fenómeno de las gotas de agua que flotan sobre agua a temperatura ambiente ha llamado la atención durante mucho tiempo. John Tyndall examinó dichas gotas en 1885, y ya antes, en 1881, Osborne Reynolds había escrito: "El hecho de que floten gotas por la superficie del agua depende sólo de lo limpia que esté dicha superficie". Aunque Reynolds no especificaba el mecanismo por el que las gotas se sostenían, pensaba probablemente que se debía a la tensión superficial. En su trabajo se indicaba que era muy raro ver gotas flotando por la superficie del agua por causa de las impurezas que dichas superficies suelen acarrear, las cuales, de alguna manera, destruyen los mecanismos de flotación.

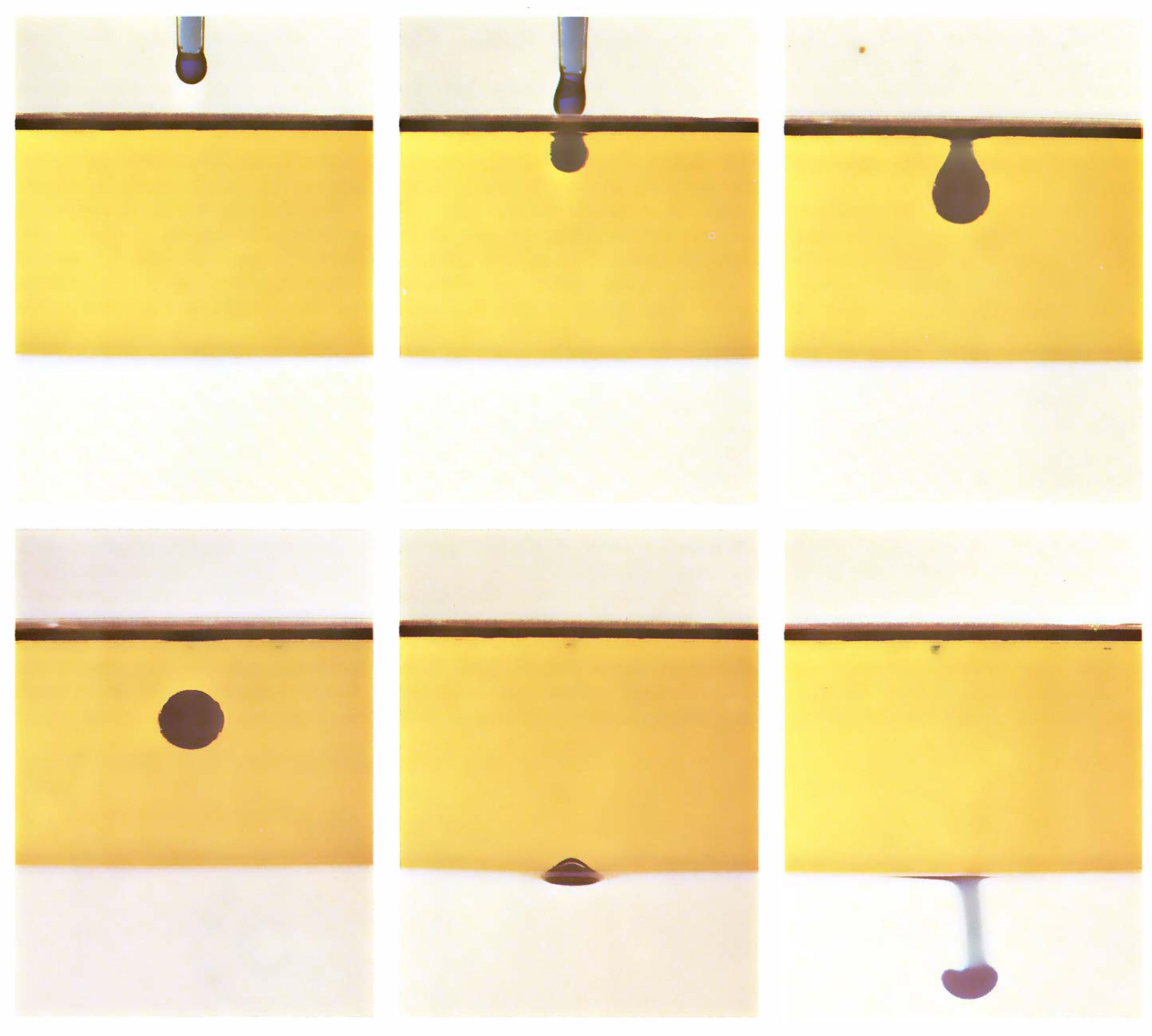
Aunque la naturaleza de las fuerzas que sostienen a las gotas se ha discutido a lo largo de casi un siglo, no creo que ya esté escrita la última palabra, y me apoyo para afirmarlo en un ingenioso experimento que me acaba de remitir James A. Raymond, del Alaska Department of Fish and Game. Raymond afirma que el tiempo de vida de la gota flotante puede alargarse de uno a varios segundos, tal vez diez, añadiendo detergente al agua. Eso se sabía perfectamente. Sin embargo, el hecho digno de mérito que Raymond ha descubierto es que las gotas pueden durar varios minutos haciendo vibrar el recipiente de manera que se formen olas estacionarias en la superficie del agua. En efecto, algunas gotas de Raymond se han mantenido hasta unos 18 minutos. Para ello sugiere que se use un aparato doméstico, una maquinilla eléctrica de cortar el cabello por ejemplo, para hacer vibrar la cara exterior del recipiente que contiene la solución de agua con detergente (dos cucharadas pequeñas por cada litro de agua). Para conseguir un mejor resultado, colocó un recipiente de plástico de un litro con la solución encima de una centrífuga algo desequilibrada. Llegó a conseguir gotas de casi dos centímetros de diámetro, haciendo que se unieran varias gotas más pequeñas o bien formándolas él mismo lentamente con una jeringuilla llena de solución.

Otras investigaciones han referido que las gotas no suelen durar si se colocan una a una, pero que si se pone un flujo constante de gotas sobre la superficie del líquido, las últimas comienzan a flotar. La explicación espontánea de por qué sobreviven las últimas gotas es que las anteriores, al recorrer la superficie del líquido, limpian las impurezas que contiene, y que de alguna manera son las responsables de la destrucción de los mecanismos de soporte. Raymond indica que parte del éxito que se consigue con el flujo de gotas puede deberse a que las primeras gotas hagan vibrar ligeramente la superficie de la masa del líquido, lo que permite que las gotas que vienen detrás floten durante un tiempo.

Raymond halló otros dos detalles de interés. Sus gotas, aunque repelidas por las burbujas de aire de la superficie del líquido, se atraían entre sí. Según parece, la



Motivo floral construido con gotas de agua teñida



Movimientos de una gota de vinagre vertido sobre una capa de aceite de semillas, suprayacente a otra capa de vinagre

repulsión y la atracción tienen que ver con la forma de la superficie del agua cerca de las burbujas de aire y de las gotas. En las burbujas, la superficie está curvada hacia arriba y la gota no subirá por ella, mientras que en las gotas la superficie está curvada hacia abajo, formando un hoyito a su alrededor, lo que hace que dos gotas adyacentes puedan fácilmente dirigirse una hacia la otra. Cuando se encuentren, pueden permanecer unidas como dos gotas, coalescer de repente para formar una sola gota o bien mezclarse con el líquido.

Repitiendo el experimento de Raymond, sustituí el vibrador doméstico por un altavoz de 152 milímetros y un audio-oscilador (ambos pueden comprarse en una tienda de equipos electrónicos). El altavoz no tenía cubierta frontal y lo coloqué boca arriba sobre la mesa. Encima de él puse un recipiente de laboratorio de los llamados "cristal de reloj", por ser muy planos; era lo suficientemente grande como para cubrir el altavoz. También hubiera podido utilizar el cristal o plástico curvado de un reloj de pared; en cualquier caso, puede comprarse un cristal de reloj de laboratorio en una tienda del ramo. La ventaja de mi montaje estribaba en que así podía controlar la amplitud y la frecuencia de la vibración. Concretamente, podía sintonizar o no fácilmente la vibración con la frecuencia de resonancia del conjunto altavoz-aire-cristal-líquido y observar también cómo el tiempo de permanencia de las gotas dependía de la amplitud de la vibración.

Mezclé unos 12 mililitros de detergente líquido con 100 mililitros de agua del grifo, vertí un poco la mezcla en el cristal del reloj y llené una jeringuilla con la solución (también puede usarse un cuentagotas). Cuando hice gotear la solución en el líquido, los resultados me parecieron tan maravillosos como debió haberlos encontrado Raymond. Al sintonizar el audio-oscilador de manera que creara olas estacionarias por resonancia (aunque fueran muy suaves) en la superficie del líquido, las gotas subsistían durante varios minutos. Con mi montaje, obtuve estos resultados para unas frecuencias de oscilación entre 10 y 150 hertz (con mi aparato no podía bajar de 10 hertz).

Cuando sintonizaba el oscilador fuera de la frecuencia de resonancia, al objeto de que las olas estacionarias desaparecieran (esto se puede hacer sintonizando una frecuencia demasiado alta o bien disminuyendo la amplitud de la oscilación), las gotas se hundían en el líquido a los pocos segundos. Solamente en presencia de la vibración, las gotas podrían flotar por un pe-

ríodo superior a los 10 segundos. Antes de recibir la carta de Raymond, me había acostumbrado ya a que las gotas durasen sólo el escaso tiempo necesario para examinarlas precipitadamente; ahora, las gotas duran tanto que me permito ir a tomar un café y, cuando vuelvo, siguen todavía allí.

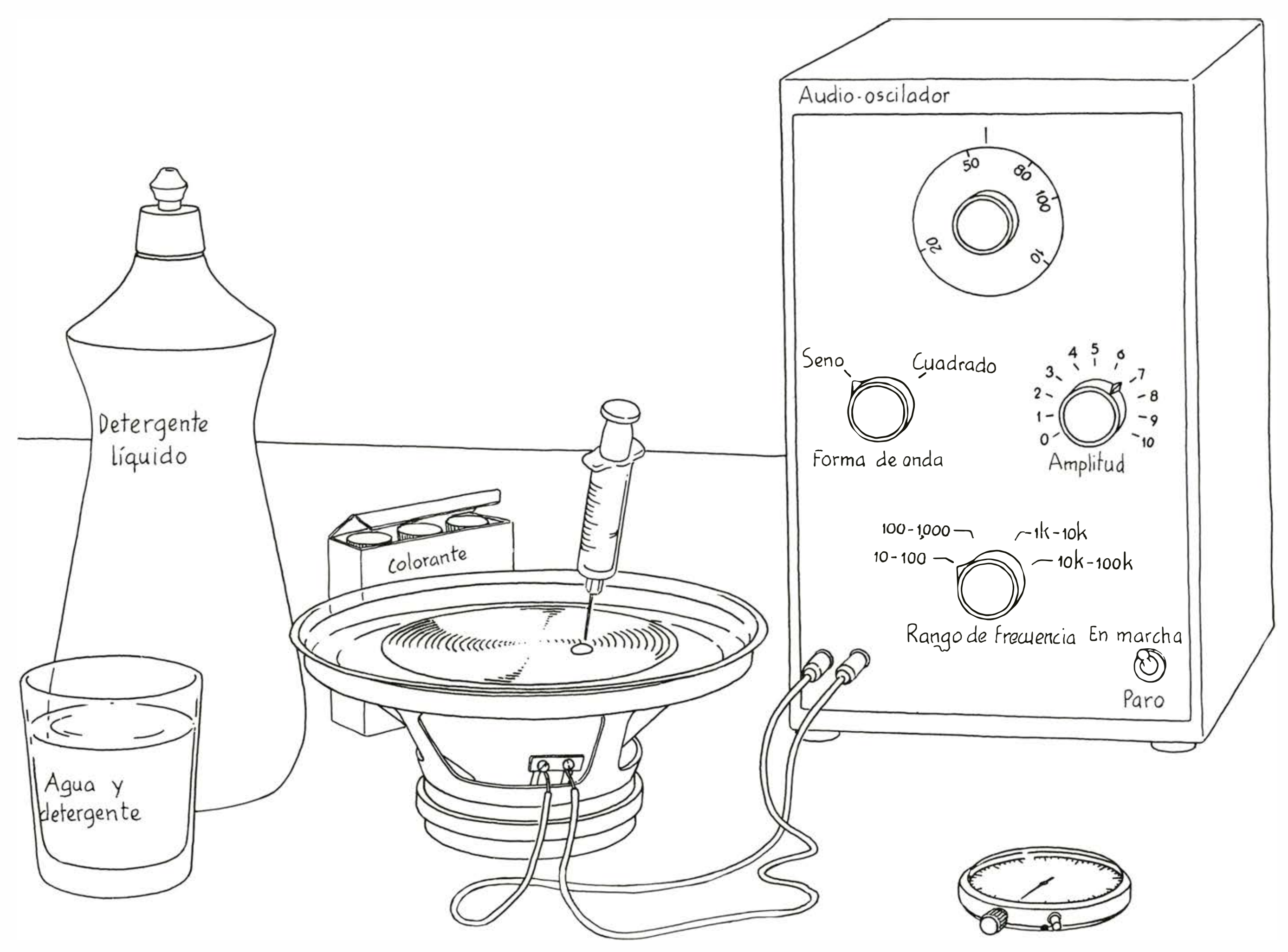
La mayoría de las gotas que flotaban tenían de uno a varios milímetros de diámetro, más o menos el tamaño de la longitud de onda de las olas de la superficie del agua cuando el oscilador estaba en 50 hertz. Haciendo que varias gotas pequeñas se unan o bien depositando con la jeringa una gran cantidad de líquido, he formado grandes gotas que producen unas depresiones significativas en la superficie del agua, y cuyo diámetro es mayor que la longitud de onda de las olas de la superficie. Si las gotitas, al unirse, no coalescen formando una sola gota, permanecerán unidas aunque diferenciadas formando una especie de balsa de gotitas flotante. Conseguí balsas de más de dos o tres centímetros de largo, cada una de ellas formada por una docena aproximada de gotitas. Con mucho cuidado conseguí hacer un bonito montaje que consistía en una gran gota central rodeada por un anillo de gotas pequeñas. Cuando más tarde comencé a usar colorante en las gotas pude hacer balsas rojas y azules y construir una especie de flor.

Como otros investigadores han referido, las gotas no siempre se portan bien. Nadie ha comprendido totalmente su voluble conducta. Hay veces en que es imposible que se formen, debido quizás a variaciones en el campo eléctrico local. Por ejemplo, un investigador que pase por delante del aparato puede provocar alteraciones en el campo eléctrico que rodea las gotas y dar lugar a que éstas se mezclen con el líquido. Las impurezas superficiales también son importantes, ya que las partículas de polvo sobre la superficie del líquido impiden que las gotas floten. Yo mismo lo comprobé vertiendo una ligera capa de polvo de licopodio (polvo orgánico hidrofóbico que se puede encontrar en cualquier establecimiento de venta de productos químicos) sobre la superficie e inmediatamente perdí mi habilidad para hacer gotitas flotadoras.

La fabricación de gotitas flotantes depende también, según parece, de la altura a la que se encuentre la jeringa sobre la superficie del agua al echar las gotas. Si dejaba, con sumo cuidado, que se formara una gota en el extremo de la aguja de la jeringa y que cayera a su aire, la gotita flotaba o no según que la altura desde la cual caía estuviera o no dentro de un determinado rango. Cuando se vertía el líquido desde más arriba, sólo podían conseguirse gotitas flotantes si al caer éstas desde la jeringa lo hacían con suficiente fuerza como para salpicar gotas de líquido que flotaran.

Se diría que la mayoría de las gotas, especialmente las grandes, se quedan inmóviles en los nodos (los sitios de mínima vibración superficial) de las olas estacionarias. Sin embargo, es muy difícil verificar esta aserción, ya que las gotas grandes provocan tal hundimiento en la superficie del líquido que destruyen cualquier formación típica de olas estacionarias en sus alrededores. Algunas de las gotas pequeñas subían y bajaban continuamente de acuerdo con el movimiento oscilatorio, con la misma forma de frenética oscilación que habíamos visto en el efecto Leidenfrost.

Una explicación del mecanismo que las mantiene a flote es que las moléculas de agua en la superficie se orientan a sí mismas, de manera que la superficie resulta eléctricamente negativa. Por tanto, el fondo de la gota, siendo negativo, es repelido por la superficie de la masa del líquido que es también negativo. La única prueba



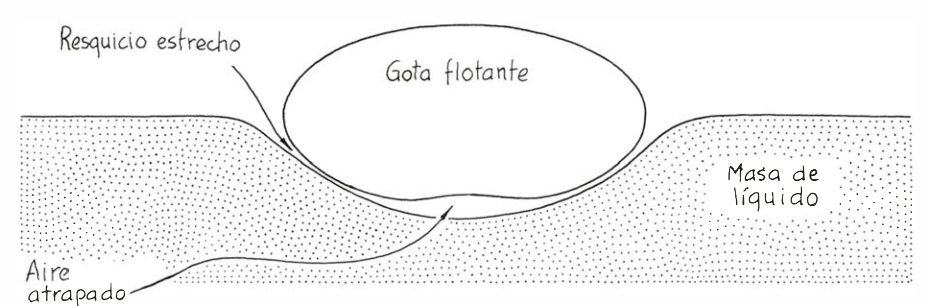
Equipo para hacer vibrar una superficie portadora de una gota

de que existe este mecanismo de repulsión, que yo haya visto, es que la presencia de un campo eléctrico externo en las proximidades de las gotas las destruye. Lo mismo sucedería aunque el mecanismo de soporte no tuviera naturaleza eléctrica, ya que las fuerzas del campo eléctrico externo podrían también anularlo.

Acerquemos una varilla cargada negativamente sobre una gota flotante. Con independencia de que la gota esté ligeramente cargada o sea neutra, el campo eléctrico de la varilla polariza la gota, de manera que su parte superior (la más próxima a la varilla) es positiva y su parte inferior (la más alejada de la varilla) es negativa. Justo por debajo de la gota, la superficie de la masa del líquido se hace positiva. Como esta superficie y la de la parte inferior de la gota –cargada con signo positivo– están muy próximas, la gota es impulsada a introducirse en el líquido. Así un campo eléctrico exterior puede hacer que la gota se funda con la masa del líquido, aun cuando la gota no hubiera estado mantenida por fuerzas de carácter eléctrico. Los campos eléctricos se usan para coalescer gotas flotantes de modo similar con el fin de obviar las nieblas indeseables.

Otra explicación (la más ampliamente aceptada) asegura que el mecanismo de soporte es una fina capa de aire que queda atrapado debajo de cada gota en el instante en que llega a la superficie del líquido. El aire forma una capa de 100 × 1000 nanómetros de espesor, y puede estar a una presión suficientemente alta como para hundir la parte inferior de la gota, de la misma manera que se hunde la superficie de la masa de líquido. El tiempo de permanencia de la gota viene determinado por la velocidad a la cual el aire se pierde o se sale a través del estrecho resquicio que rodea la parte de superficie deprimida. Una vez que la capa de aire se hace muy estrecha (menos de 50 nanómetros), ya no resiste el peso de la gota y éste termina por romper dicha capa. Entonces, la gota se mezcla con toda la masa del líquido o bien se divide en gotitas que continúan flotando.

La velocidad con que se pierde la capa de aire depende de tres factores: posible desequilibrio de las tensiones superficiales en la superficie de la masa del líquido, viscosidad de la masa de líquido y de la gota y viscosidad del aire atrapado debajo de la misma. A medida que el aire se va escapando, éste intenta arrastrar consigo la capa superior de la masa de líquido. Si el líquido tiene una viscosidad alta, la corriente –tanto de líquido como de aire– se frena, y la gota resiste un tiempo relativamente largo. La incorporación de detergente en el agua incrementa el tiempo de flotación por la razón anterior. Aunque el detergente rebaja la tensión superficial del agua incrementa la viscosidad de la superficie. Si se sustituye el aire por otro gas más viscoso, como el dióxido de carbono, o se utiliza un líquido más viscoso, la velocidad a la cual el aire se pierde también se hace menor y, por tanto, aumenta la duración de la gota.



Mecanismo de aire atrapado para hacer flotar una gota

El hecho de que la tensión superficial en la zona de la masa de líquido de que estamos tratando sea uniforme es un factor importante. Supongamos que la tensión superficial justo debajo de una gota fuera menor debido al vapor emitido por la misma. Entonces, la mayor tensión superficial de la región exterior a la zona contaminada echaría la masa de líquido en dirección radial hacia fuera, arrastrando el aire atrapado con dicha masa y, por tanto, disminuyendo el tiempo de vida de la gota. Ese tipo de movimiento a lo largo de la superficie del líquido, provocado por la no uniformidad de las tensiones superficiales, se denomina "efecto Marangoni" (en honor de Carlo G. M. Marangoni, quien lo estudió en la última mitad del siglo XIX). Con una gota de agua su tiempo de vida varía de 3 a 10 segundos, dependiendo sobre todo de la viscosidad del aire y de la viscosidad de la solución del agua con el detergente.

La idea del aire atrapado debajo de la gota ayuda a explicar por qué mis gotas flotaban si se las dejaba caer desde una altura dentro de un determinado rango. Si, por casualidad, dejaba caer una gota justo desde la misma superficie, es decir, a una altura prácticamente cero, la gota llegaba a la superficie del líquido con una velocidad relativamente baja y, por lo visto, no atrapaba aire. Una mayor altura le daba una mayor velocidad, que le permitía atrapar suficiente cantidad de aire como para soportar a la gota. Si la altura de caída era demasiado elevada, las salpicaduras (es decir, la corona que rodea el punto de impacto o el chorro central vertical que sigue a la corona en expansión) podían producir gotas flotantes.

Este modelo también explica la ausencia de gotas flotantes en agua sucia o con polvo. Cualquier partícula de polvo o cualquier pelo presente en la superficie del líquido podrían pinchar la capa de aire y provocar que la gota se hundiera confundiéndose con toda la masa de líquido.

Si se acepta este modelo como mecanismo de soporte en la flotación de las gotas, dicho modelo debe explicar también el porqué si se hace vibrar la masa del líquido aumenta la vida de las gotitas. Raymond sugirió que de alguna forma esta vibración podría bombear aire bajo las gotas, de manera que continuara sustentándolas. Me atraía tal idea, pues estaba de acuerdo con la hipótesis generalmente aceptada de que el aire atrapado es el que actúa como mecanismo de soporte. Dicho bombeo podría venir verosimilmente de la manera de moverse la superficie de la masa del líquido, que arrastraría aire para colocarlo debajo de las gotas. Imaginemos una pequeña gota situada en el nodo de un conjunto de olas estacionarias. Como las zonas de fluido, a la derecha y a la izquierda, oscilan en desfase entre sí, podría haber un intercambio periódico de líquido entre la derecha y la izquierda por debajo de la gota, arrastrando aire durante el proceso. Incluso fuera de la superficie de circulación, las oscilaciones combinadas de la superficie y la gota pueden atrapar periódicamente más aire, para llevarlo debajo de la gota.

Aunque el aire puede bombearse así debajo de las gotas, el modelo presenta algunos problemas. Primero, no acabo de ver cómo las oscilaciones combinadas de la superficie y la gota pueden poner más aire bajo la gota mientras que el peso de la misma está tratando de expulsar el aire fuera de esa zona. Segundo, las balsas de agua que he descrito son difíciles de explicar sin recurrir a la hipótesis de que el aire atrapado debajo de las gotas centrales está tan lejos del perímetro de una balsa que no se escapa con facilidad y, por tanto, no necesita ser reemplazado.

El tercer problema es más difícil. No hubo manera de que detectara circulación de agua cerca de una gota flotante sola. Para localizar la circulación, puse una pequeña cantidad de colorante en la masa del líquido y conseguí que un filamento fino de colorante estuviera cerca de una gota. Trabajé con dos tipos de colorante: uno fucsia (que se puede obtener en tiendas de suministros industriales) y el otro azul común (también puede ser colorante doméstico rojo). Poniéndolos en pequeñas canti-

dades, ninguno de los colorantes parecía alterar el mecanismo de soporte de las gotas por medio de cambios radicales en la tensión superficial o la viscosidad de la masa de líquido. Podía acercar una gota a un filamento de colorante colocando la aguja de mi jeringa cerca de la gota. Debido a que el líquido se curvaba hacia arriba, sobre la aguja, la gota se alejaba. Podía esperarse que cuando una gota alcanzaba el filamento de colorante cualquier circulación por debajo de la gota transportara parte del filamento consigo, pero yo observé este efecto muy raramente. Si existe circulación por debajo de la gota, ésta es sorprendentemente lenta, incluso imperceptible. Hallé, sin embargo, muestras de circulación cuando dos o más gotas estaban flotando una al lado de la otra: aquí las vibraciones de cada gota alteraban las vibraciones de las otras. Esta circulación podría introducir aire debajo de las gotas.

También comprobé si la gota tenía circulación interna que pudiera bombear aire a la parte inferior de ésta. Para ello logré primero una gran gota flotante uniendo varias pequeñas. Añadí después otra gotita teñida. Tras varios intentos conseguí que esta gotita teñida se incorporara a la gota transparente mayor, y esta adición de colorante a la gota grande me permitió averiguar los tipos de circulación interna. Pensaba que la gota podría desarrollar una corriente descendente en su parte exterior y ascendente en el centro, arrastrando así aire por debajo de sí misma. La pista de colorante reveló la inexistencia de tal modelo interno. La realidad fue que el colorante se extendió por la gota con bastante lentitud, y ningún movimiento inmediato del mismo parecía deberse al giro de la gota a consecuencia de la alteración producida por la coalescencia.

¿Por qué ocurre entonces que las gotas colocadas en la superficie de una líquido vibrante duran mucho más? Otros experimentos han determinado que es una repulsión eléctrica el principal mecanismo de soporte, pero yo no veo cómo puede incrementarse esa fuerza por la vibración. Aun cuando los modelos de circulación y bombeo de aire en la parte inferior de una gota me resultan muy atractivos, no puedo observar ninguna circulación de buenas a primeras. Sin embargo, el hecho es que las gotas duran mucho más en una superficie que vibra.

Pude sacar buen partido del examen de las gotas flotantes bajo una luz de strobe colocada a una frecuencia próxima a la frecuencia de oscilación, de manera que el centelleo de la luz redujera eficazmente la vibración de las gotas. Encontré dos tipos de vibraciones entre las gotas: las muy pequeñas llegaron a oscilar tanto (debido a la superficie vibrante) que saltaban por el aire cada vez que la superficie se abombaba. Probablemente, estas gotas volvían a tomar aire al alcanzar la superficie de la masa otra vez; por ello retrasaban su coalescencia con la masa de líquido hasta que algún contratiempo casual las destruía.

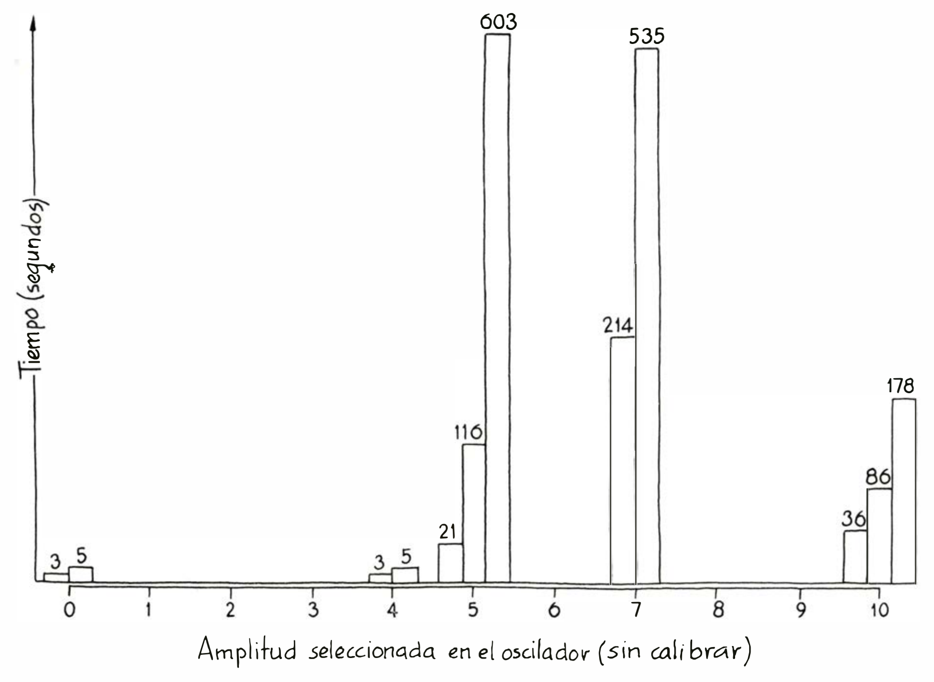
Por otro lado, una gota mayor no abandonaba la superficie y su centro de masa no parecía moverse mucho verticalmente. La gota oscilaba variando periódicamente desde una forma relativamente alta y delgada a otra relativamente baja y gruesa. Vista esta variación de tamaño desde arriba, ésta era simétrica alrededor de la gota. Rodeando la gota había círculos concéntricos de ondas de superficie generadas verosímilmente por las vibraciones de las gotas.

Yo creo que siempre que el líquido base situado directamente debajo de la gota empujaba hacia arriba la capa de aire, la parte inferior de la gota era también impulsada hacia arriba, obligándola a extenderse. Dado que la gota se sometía a oscilación hasta la resonancia o cerca de ésta, por el líquido base se producía un desfase de entre 0 y 90 grados entre los dos movimientos. En otras palabras, la gota podría llevar un retraso con relación al líquido base de un cuarto del período de oscilación. La expansión radial de la gota empujaba a su vez (por medio de la capa de aire) el borde del hoyuelo, produciendo un pico en las ondas de la superficie. Siempre que el líquido base descendía por debajo de la gota, ésta se hacía más fina y se expandía verticalmente a medida que el borde del hoyuelo se movía radialmente hacia dentro.

Este movimiento a lo largo del borde mengua, en general, la pequeña rendija a través de la cual el aire debe escaparse en algún momento, si la gota acaba por coalescer con el líquido base. La velocidad a que escapa depende del cubo del ancho de la rendija; ello significa que, si ésta se estrecha, el tiempo que tardará en escapar puede ser notablemente más largo. Supongamos que la rendija se estrecha desde 200 nanómetros, en una situación de calma, a 50 nanómetros, en situación de vibración, lo que significa una reducción de la cuarta parte. El tiempo de escape y, por tanto, el de vida de la gota se incrementaría en 4^3, o 64, veces. Si el tiempo medio de duración es de 10 segundos en una superficie en calma, subiría a casi 11 minutos en la superficie vibrante. Por ello, una gota dura evidentemente más, ya que la vibración hace más estrecha la ruta de escape del aire que soporta la gota.

Cuando coloqué dos gotas una junto a la otra, cada una perturbaba las oscilaciones de la otra y distorsionaba la componente de expansión radial en sus vibraciones. Desde arriba pude ver cómo cambiaba cada gota desde una forma oblonga y perpendicular a una línea que pasaría por los centros de las gotas hasta ser algo oblonga y paralela a la línea. Las gotas estaban siempre en fase en estos cambios. Usando un colorante descubrí que el líquido base era impulsado hacia arriba bajo las gotas desde ambos lados, a lo largo de la línea que atravesaba sus centros; después era expulsada hacia fuera entre las gotas perpendiculares a esa línea.

Algunos de mis resultados obtenidos respecto a la duración de las gotas a 50 hertz están representados en la ilustración de la izquierda en función de los valores de amplitud –no calibrada– del audio-oscilador. Las gotas tenían todas el mismo ta-



Tiempos de flotación de gotas de agua en una superficie de agua con detergente

maño aproximadamente (unos milímetros de diámetro) y les permití caer desde la misma altura, pero no las dejé que se fusionaran con otras gotas (tenía la impresión de que la coalescencia alargaba la duración de las gotas, pero no llegué a comprobarlo). No tengo razones para dar por supuesto que la relación entre su separación y la amplitud de las vibraciones en el agua de mi cristal de reloj sea lineal; es probablemente bastante complicado. Sin embargo, se pueden ver dos interesantes características en estos datos. Con poca o ninguna amplitud de oscilación, las gotas duraban muy poco tiempo. En el rango intermedio era donde más duraban. Con amplitudes mayores la duración decrecía, probablemente porque las oscilaciones en el líquido base eran tan violentas que las gotas al moverse perdían su soporte de aire. La segunda característica interesante es que aun cuando algunas gotas duraban mucho tiempo (el récord fue de unos 10 minutos), otras con el mismo valor de amplitud y bajo circunstancias aparentemente iguales duraban poco.

Traté de aislar una gota flotante de varias formas: poniendo balsas de burbujas de aire, haciendo descender un anillo a su alrededor o colocando un lazo de alambre en el líquido base y tirando luego del alambre hacia arriba para colocar una burbuja de jabón sobre la gota flotante. Siempre que el agua que rodeaba a la gota continuara vibrando, aunque fuera suavemente, ésta podía durar largo tiempo.

El lector quizá se pregunte por qué las gotas que se tocan no se funden siempre inmediatamente. Pienso que una capa de aire atrapado debe permanecer entre ellas de la misma forma que otra está debajo. Cuando dos gotas se juntan, una cae dentro del hoyuelo de la otra y, por ello, adquieren una mayor velocidad horizontal. Si esa velocidad es suficiente, puede ocurrir que entre las gotas quede aire atrapado y éste necesita cierto tiempo para fugarse. A veces, la capa de aire es lo suficientemente fina como para que las gotas se fundan y formen una sola. También puede ocurrir que la vibración haga que se rompan las capas de soporte y las gotas se fundan con el líquido base. El mecanismo de fusión de las gotas es importante para el estudio de las nieblas y brumas, donde las gotitas suspendidas en el aire entran en contacto y posiblemente se funden para formar gotas mayores.

El fluido que soporta una gota no tiene por qué ser aire ni gas. Lo que se necesita es una gota que caiga a través de otro fluido, en el que no se mezcle, y que encuentre un líquido base de su mismo tipo. Por ejemplo: yo vertí una capa de vinagre en un recipiente y después añadí otra capa de aceite de semillas. Cada capa tenía un espesor de dos centímetros, por lo menos. Con la jeringa inyecté pequeñas cantidades de vinagre en una pequeña zona de la superficie del aceite, creando una gota que colgaba de la capa de aceite. Llegó un momento en que la gota adquirió suficiente peso y se desprendió de la capa de aceite para caer en la de vinagre. Al principio, la caída hizo que la gota fuera descendiendo con rapidez, pero a medida que se aproximaba a la capa de vinagre fue reduciendo su velocidad porque el aceite entre ésta y el aceitevinagre de la interfase tenía que ser presionado y retirado del camino. Cuando la gota alcanzó la interfase, quedaba aún algo de aceite atrapado debajo de la gota, la cual se asentó en la interfase con el mismo hoyuelo característico de las gotas de agua. Al minuto, más o menos, la gota entró en la capa de vinagre, según parecía porque la de aceite bajo la misma había llegado a ser suficientemente fina. Teñí las gotas de vinagre para ver más claramente este proceso y el consecuente movimiento del vinagre hacia su propia capa. Me resultó muy bonita la contemplación de una gota azul o roja en medio de la capa amarilla de aceite que esperaba a que la capa de éste fuera lo suficientemente fina para poder escapar.

¿Se puede prolongar, por medio de la vibración, la vida de las gotas de vinagre situadas en la interfase de los líquidos? La respuesta es afirmativa. Cuando coloqué el recipiente en mi cristal de reloj e hice vibrar entrando en resonancia el conjunto como anteriormente, la duración de la gota aumentó desde alrededor de un minuto hasta 2,5 o 3 minutos.

Cuando una burbuja de aire asciende a través de un fluido y choca contra un objeto plano, como el fondo de un recipiente sumergido en el fluido, éste necesita algún tiempo para apartarse del camino (como ocurría con el aceite y las gotas de vinagre). La burbuja alcanza primero el obstáculo plano, permaneciendo una fina lámina entre el aire y la barrera. A una velocidad que depende de la viscosidad del fluido, la lámina fluye fuera del camino de la burbuja haciéndose tan fina que al final ésta se rompe y el aire toca el obstáculo directamente.

Se pueden hacer muchos más experimentos con gotas flotantes; utilizando agua como líquido base se puede tratar de conseguir gotas flotantes de fluidos distintos del agua. Yo conseguí hacer flotar gotas de alcohol sobre una lámina de alcohol. Se podría intentar con aceites tanto en experimentos de gota flotante como de burbuja ascendente. ¿Se produce el alargamiento de la vida de las gotas por vibración en agua más profunda? No lo sé; podría averiguarse. Para obtener una duración larga de la gota, ¿son necesarias ondas vibratorias de aproximadamente su tamaño? ¿Permanecerán las gotas flotando durante varios minutos si la frecuencia de la vibración está claramente por encima de 150 hertz o si es menor de 10?

El lector podría estar interesado en realizar experimentos con gases distintos del aire o con líquidos de soporte diferentes del aceite de semillas. ¿Es siempre favorable la vibración? En el experimento de las gotas de agua se puede intentar obtener una correspondencia entre la concentración del detergente y la duración de las gotas. En particular, podría encontrarse un estancamiento en la duración de éstas a partir de cierta concentración, lo cual implicaría un estancamiento en el cambio de la viscosidad superficial debida al detergente. Suponiendo que la vibración fuera completamente estacionaria en un experimento con una gota de agua, ¿flotarían las gotas durante horas o es su límite más alto 18 minutos? Si la duración resulta ilimitada, mi explicación de cómo alargan el tiempo las vibraciones es errónea.

Al jugar con el agua es posible que veamos fenómenos originados por la tensión superficial, y puede llevarnos a pensar en un viejo juego de salón. Para hacerlo hay que llenar un vaso de agua limpia, espolvorear pimienta en la superficie y acercar al agua, por un lado, un trozo de jabón; las partículas de pimienta se amontonarán en el lado opuesto.

Este movimiento a través de la superficie es otjabón depositada en la superficie rebaja inmediatamente la tensiada en la superficie rebaja inmediatamente la tensión superficial, y la zona libre de jabón se contrae debido a su mayor tensión superficial. Las partículas de pimienta son atrapadas por la contracción y sufren, consecuentemente, un desplazamiento.

En otro juego de salón se colocan pequeñas partículas de alcanfor (que se puede adquirir en casas dedicadas al suministro de productos químicos) en la superficie de agua limpia. Debido a la velocidad variable a la que el alcanfor se disuelve alrededor de su perímetro, las partículas danzan de un lado para otro. Para explicarlo, supongamos que una esquina cualquiera de una partícula se disuelve antes, con lo cual la tensión superficial en ese punto desciende y la partícula es atraída por la tensión superficial mayor existente en el otro lado. Después, se disuelve otra esquina y, de nuevo, es atraída la partícula hacia el lado opuesto, hasta que se ha disuelto una cantidad de alcanfor suficiente para hacer que la tensión de la superficie circundante sea ya inferior al valor necesario para atraer a las restantes moléculas fuera de la partícula. Hace años los niños jugaban con barquitos impulsados por alcanfor y alcohol depositados en la popa. Las dos sustancias rebajaban la tensión superficial local, haciendo que al ser mayor ésta a proa impulsara el barco hacia delante.

Libros

Genética, o la madurez de una ciencia joven, y la importancia de la fijación del nitrógeno

Eduardo Petitpierre y Francisco Gil

FACETAS DE LA GENETICA. Selecciones de *Scientific American*, con introducciones de Adrian M. Srb, Ray D. Owen y Robert S. Edgar. Traducción ampliada de la primera edición norteamericana por Juan Manuel Ibeas Delgado y revisada por Juan Ramón Medina Precioso. 499 págs., Editorial Blume, 1978. Los editores de esta nueva serie de selecciones de *Scientific American*, Srb, Owen y Edgar, son conocidos genetistas que han publicado en colaboración o por separado diversos libros de su especialidad. En la edición española se han añadido algunos artículos para actualizarla, la edición original es de 1969, con el fin de aportar los conocimientos científicos más recientes, y se ha modificado ligeramente la estructuración primitiva en consonancia con el nuevo contenido.

El conjunto de los cuarenta y tres artículos seleccionados en el libro cubre la parte fundamental de los descubrimientos que han revolucionado la Genética en las últimas décadas para configurarla como una de las ciencias punteras de la Biología moderna. El período cubierto por estos artículos abarca treinta años; no es, pues, de extrañar que ciertos trabajos tengan un cierto sabor añejo, pero su inclusión es necesaria como puntos de referencia que marcaron nuevas etapas en el progreso de la Genética; de este modo puede seguirse la continuidad histórica del desarrollo de los conocimientos científicos en esta disciplina.

El libro está dividido en siete partes que corresponden en líneas generales a grandes áreas de la investigación genética. Una simple ojeada al contenido de cada una de estas partes nos demuestra que, salvo quizá los aspectos esenciales de las dos primeras, siguen siendo objeto de atención preferente en las líneas de trabajo de múltiples laboratorios y centros de investigación, para dilucidar detalles e incluso aspectos esenciales todavía no bien aclarados y sujetos a controversia. Se plantean, pues, temas de la actualidad científica más reciente en un lenguaje asequible para cualquier persona no especialista con un cierto nivel cultural, como corresponde al público lector de *Scientific American* o de *Investigación y Ciencia*.

La primera parte está dedicada al *material genético*, es decir, los ácidos nucleicos. Se inicia con un artículo de Hotchkiss y Weiss sobre "La transformación bacteriana", fenómeno cuya comprensión permitió decantar en favor del ADN y no de las proteínas el papel de moléculas responsables de la herencia. Las moléculas de los ácidos nucleicos deben cumplir dos funciones indispensables para el mantenimiento de cualquier tipo de características heredables: capacidad autorreplicadora y un sistema de cifrado informativo del mensaje genético. El porqué las moléculas de ADN tienen esta capacidad autorreplicadora es analizado por A. Kornberg en el artículo "La síntesis del ADN". La separación de las dos cadenas de la doble hélice de ADN y su utilización como moldes para sintetizar cadenas complementarias es el mecanismo que asegura la conservación íntegra y la transmisión de los caracteres hereditarios. El conocimiento de las sucesivas etapas y de los factores implicados en la síntesis del ADN hizo posible, por primera vez en la historia, la síntesis artificial de un virus bacteriano sencillo en un medio libre de células.

El cómo se expresa el mensaje contenido en el ADN es objeto de dos artículos de Francis Crick, titulados "El Código genético". Su autor, uno de los codescubridores del conocido modelo de la doble hélice de ADN, describe con sencillez y precisión los datos experimentales en favor de una clave de lectura por tripletes de nucleótidos, las técnicas empleadas para descifrar el significado de cada uno de los 64 posibles tripletes, y los rasgos esenciales del sistema de reconocimiento de los sucesivos tripletes del ARN mensajero por los correspondientes aminoácidos que van incorporándose a proteína. La combinación de las técnicas de autorradiografía con la microscopía electrónica permite la "Visualización de genes en acción", un interesante artículo de Miller que confirma al nivel de ultraestructura citológica los hallazgos bioquímicos y genéticos previos. En "Aislamiento de genes", por D. D. Brown, se explica la metodología empleada para separar a los genes del ARN ribosómico, lo cual hace factible el análisis de su estructura, localización cromosómica y de la evolución que han experimentado sus secuencias de nucleótidos. El perfeccionamiento de esta metodología tendrá consecuencias importantísimas para el desarrollo de la ingeniería genética (véase también el artículo final del libro por Cohen sobre la manipulación de genes).

El siguiente capítulo, *La naturaleza del gen*, trata de dilucidar en qué consisten exactamente los genes y cuál es su actividad primaria inmediata. Incluye en el artículo "Estructura íntima del gen" los experimentos realizados por Benzer, en su análisis de la región rII del bacteriófago T4, y en el artículo "Estructura del gen y de la proteína" los experimentos de Yanofsky sobre el gen A de la triptofanosintetasa de *Escherichia coli*. Gracias a estos experimentos se consiguió probar que los genes son segmentos de ADN con una secuencia definida de nucleótidos. Cada una de las parejas de nucleótidos del ADN puede ser susceptible de mutación, y la localización de las diversas mutaciones en un mapa de estructura fina de un gen, basada en la medida de las frecuencias de recombinación, es exactamente colineal con la del mapa de las sustituciones de aminoácidos inducidas por las mutaciones en la proteína sintetizada por el gen. El descubrimiento de cuáles son los productos moleculares inmediatos de la acción génica, las proteínas, se describe en el trabajo ya clásico de Beadle, "Los genes de los hombres y de los mohos", que puede considerársele sin lugar a dudas como el punto de partida de la Genética bioquímica. Por último, aunque la gran mayoría de los caracteres hereditarios están controlados por genes nucleares cuya transmisión se realiza según leyes mendelianas, existen también genes extracromosómicos, los cuales se heredan según leyes distintas a las descubiertas por Mendel. Estos genes no nucleares se encuentran en las mitocondrias y en los cloroplastos, orgánulos citoplasmáticos provistos de material genético y de los sistemas necesarios para la síntesis proteica, hecho que les confiere una cierta autonomía metabólica con respecto a la información genética nuclear. Los aspectos relativos a la información genética de estos orgánulos citoplasmáticos se destacan en el artículo de Sager, "Genes extracromosómicos", y en el artículo de Goodenough y Levine, "Actividad genética de mitocondrias y cloroplastos".

Un conocimiento adecuado de los sistemas de control de la acción génica es el objetivo prioritario para tratar de explicar, de una manera causal y no simplemente descriptiva, el desarrollo morfogenético de los organismos superiores. La actualidad e importancia de esta línea de la investigación genética se puede captar de un modo indirecto si observamos que se le dedican un total de diez artículos en la parte tercera del libro, bajo el epígrafe de *Del gen al organismo*. La diversidad de los enfoques de estos artículos nos indica la complejidad del problema a resolver y la pluralidad de las facetas concernientes a los mecanismos de la regulación génica. Los casos más simples dentro de su relativa complejidad son los sistemas de regulación descubiertos en los organismos procariotas. Changeaux trata en "El control de las reacciones bioquímicas" el sistema de regulación de la síntesis de enzimas en bacterias cuya comprensión llevó a formular la teoría del operón, hoy en día plenamente aceptada. Ptashne y Gilbert, en el artículo "Represores genéticos", estudian las moléculas, represores, responsables de la regulación por control negativo de los operones bacterianos o víricos. El aislamiento de varios represores ha permitido comprobar datos de gran interés para explicar su especificidad de acción molecular según su estado alostérico. Wood y Edgar, en "Cómo se hace un virus bacteriano", destacan que el orden de formación de las distintas partes de un virus bacteriano se realiza por un sistema de control, analizado basándose en mutantes con alteraciones específicas sobre la morfogénesis normal.

El control de la actividad génica en los organismos eucariotas presenta características propias, distintas de las descritas en bacterias y virus. En el artículo "Proteínas cromosómicas y regulación génica", Stein, Stein y Kleinsmith estudian la composición química de los cromosomas eucarióticos y el posible papel de regulación génica específica ejercido por las proteínas no histónicas, en contraposición a la función represora generalizada de la actividad génica desempeñada por las histonas. En otros dos trabajos, "Puffs cromosómicos", por Beermann y Clever, y "Hormonas y genes", por Davidson, se estudian respectivamente los puffs de los cromosomas gigantes como sistemas apropiados para detectar variaciones en la actividad génica a lo largo del desarrollo, y el efecto de distintas hormonas como activadores selectivos de funciones génicas específicas para distintos tejidos u órganos. En "El ciclo celular", por D. Mazia, se investigan en detalle las cuatro fases de dicho ciclo comunes a todo tipo de células, para poner de manifiesto características citológicas de ultraestructura y características bioquímicas propias de cada una de dichas fases. También la técnica de trasplante nuclear, descrita por Gurdon en el artículo "Trasplante nuclear y diferenciación celular", es un instrumento muy útil para conocer las interacciones núcleo-citoplasmáticas y el control genético de distintos procesos de diferenciación celular. Hadorn, en el artículo "La transdeterminación celular", en una técnica análoga a la anterior, utiliza los trasplantes de discos imaginales de larvas de *Drosophila* a otras larvas para detectar sus diferentes potencialidades genéticas.

Estas potencialidades están prefijadas de antemano cualquiera que sea su nueva localización por efecto del trasplante, exceptuando aquellos casos de transdeterminación en los que se producía un cambio de destino al activarse grupos distintos de genes. En el último artículo de este capítulo, Wesells y Rutter analizan "Las fases de la diferenciación celular" del páncreas, tanto desde el punto de vista embriológico como bioquímico, a partir de los distintos niveles de acumulación de enzimas y hormonas elaboradas por este órgano, destacándose la importancia de las interacciones celulares para la diferenciación.

Los artículos acerca de *Genética y Evolución* se agrupan en el capítulo cuarto del libro. Sirve de introducción al tema el artículo de Dobzhansky, "La base genética de la evolución", en el cual después de realizar una breve reseña histórica de la teoría de la evolución discute los factores subyacentes en todo fenómeno evolutivo, es decir, la capacidad de cambio genético por mutación y el aprovechamiento o eliminación de los mutantes por efecto de la selección natural; distintos ejemplos de adaptación a ambientes particulares, el origen de razas y el de especies parecen ser debidos fundamentalmente a la combinación de los efectos de la mutación y de la selección natural. El siguiente artículo, "Las causas de la diversidad biológica", por B. Clarke, publicado veinticinco años después que el precedente, ofrece unas perspectivas mucho más amplias en el análisis de los problemas planteados por Dobzhansky que sirven de referencia para entender el considerable progreso conseguido en este lapso de tiempo. Clarke ilustra diversos casos de polimorfismo genético y demuestra de forma convincente que su mantenimiento es dependiente de la selección natural y no por causas aleatorias como sugiere la teoría neutralista. Kettlewell analiza en otro artículo, "Las pruebas que le faltaron a Darwin", las causas del fuerte incremento en la frecuencia de formas melánicas de varias especies de polillas con respecto a las normales en distintas regiones de Ingla-

terra caracterizadas por una fuerte contaminación industrial; en dichas regiones las formas melánicas están más "protegidas" que las normales por tener más mimetismo ambiental frente a sus depredadores habituales. La relación entre "La radiación ionizante y la evolución", por Crow, insiste especialmente en las consecuencias generales de la mutación en las poblaciones naturales y su influencia sobre procesos evolutivos. El análisis de la estructura primaria de proteínas homólogas en múltiples especies es uno de los medios utilizados para estimar grados de parentesco interespecífico y líneas evolutivas. Zuckerkandl nos muestra en "La evolución de la hemoglobina" un ejemplo práctico de esta nueva metodología en los estudios sobre evolución. En una línea de suma aplicación práctica del análisis molecular se toman los datos de estructura primaria de una o más proteínas comunes a muchas especies para construir árboles filogenéticos, según expone Dayhoff en otro artículo titulado "Análisis con computadora de la evolución de proteínas".

En un libro sobre Genética no podían faltar aquellos aspectos de esta ciencia que atañen directamente al hombre, englobados en la parte quinta, *La genética del hombre*. El artículo de Eckhart, "La genética de poblaciones y el origen del hombre", analiza desde una óptica propia de la Genética de Poblaciones las especies de antropoides fósiles consideradas como posibles antecesoras del hombre. En el siguiente trabajo, "Genética de las poblaciones humanas", Cavalli-Sforza nos demuestra que el nivel de diferencia entre individuos de una misma población es superior al existente entre poblaciones distintas, y a la vez discute las posibles causas y factores determinantes del origen de las razas humanas. La elaboración de "Mapas cromosómicos humanos" es abordada por V. A. McKusick a partir del estudio de genealogías en las que se investigan varios caracteres simultáneamente. El posible papel que haya podido jugar la deriva genética en la evolución humana se pone de manifiesto en el artículo de Glass, "Los Dunkers: un caso de deriva genética", sobre las características genéticas de los individuos de esta secta religiosa que prueban el efecto de la deriva en una comunidad pequeña y cerrada en la reproducción. El artículo de Muller sobre "Radiación y mutaciones en el hombre" sigue conservando su interés y actualidad pasados más de veinte años de su publicación, porque incide en los peligros que comporta para la evolución del hombre la acumulación de mutaciones perjudiciales, y las posibles medidas eugenésicas para combatir estos efectos. Mittwoch, en "Diferenciación sexual en las células", destaca las técnicas para distinguir células humanas normales de uno u otro sexo, y también células que presentan dosis anormales de cromosomas sexuales, con una serie de consecuencias obvias en la práctica clínica.

En el capítulo sexto se incluyen los artículos que hacen referencia a las *aplicaciones de la Genética*. Watanabe en "Resistencia a los antibióticos", trata de la transferencia múltiple de estos factores de resistencia entre cepas bacterianas y de las consecuencias inmediatas en la prevención y tratamiento de las enfermedades producidas por algunas de estas bacterias. En "El trigo híbrido", Curtis y Johnston detallan los procedimientos para obtener estas variedades de trigo de uso cada vez más extensivo por su alta productividad. Otro aspecto aplicado de gran interés para el hombre es "La prevención de los niños rhesus", descrito en un artículo de C. A. Clarke, en el cual se explican las técnicas modernas de prevención de las incompatibilidades sanguíneas Rh entre madre y feto, inspiradas curiosamente en las investigaciones del propio autor sobre los factores genéticos responsables del mimetismo batesiano en ciertas mariposas tropicales. El conocimiento de muchas enfermedades hereditarias y su posible tratamiento se ve actualmente facilitado gracias al "Diagnóstico prenatal de enfermedades genéticas", un artículo de Friedman donde se valoran las consecuencias de muy diversa índole que pueden derivarse de este reconocimiento precoz de las anomalías hereditarias. Por último, en "La inducción de cáncer por virus", Dulbecco demuestra la etiología vírica de bastantes formas de cáncer y las alteraciones citológicas y bioquímicas inducidas por las transformaciones cancerosas.

La parte final del libro contiene artículos de reciente publicación que han supuesto cambios muy importantes en las líneas de investigación genética, abriendo múltiples perspectivas para un renovado desarrollo de la Genética en el futuro más inmediato. El encuadre de estos artículos bajo el epígrafe de *Fronteras de la Genética* es justificado porque corresponden a la mayoría de aquellos problemas que suscitan interés primordial en las investigaciones de vanguardia. "La síntesis de ADN dirigida por ARN", artículo del que es autor Howard Temin, descubre la existencia de ciertos virus de ARN, productores de tumores en animales domésticos, con un sistema de síntesis del ADN completamente desconocido hasta entonces y que guarda analogías con ciertas transformaciones cancerosas inducidas por virus. En un artículo básico para el conocimiento de la organización del material genético de los

eucariotas, Britten y Kohne prueban la presencia de "Segmentos repetidos de ADN" en todas las especies de eucariotas, cuyos posibles efectos en el control de la expresión génica y en la evolución requieren todavía muchas investigaciones clarificadoras. El artículo de Edelman, "Estructura y función de los anticuerpos", versa sobre la molécula de inmunoglobulina y la especificidad de las reacciones inmunitarias, conocimiento que implica un avance hacia la resolución del problema de la diferenciación y evolución del sistema inmunitario. Una metodología de alta creatividad, muy adecuada para el progreso en la Genética del Comportamiento, es ofrecida por Benzer en su artículo sobre "Análisis genético de la conducta", mediante una disección extraordinariamente precisa de distintos caracteres etiológicos en *Drosophila* utilizando individuos mosaico para mutantes que bloquean la manifestación de dichos caracteres en etapas específicas de la respuesta a un estímulo ambiental. El artículo que cierra esta serie y también el libro, "Manipulación de genes: la transferencia de información genética", por S. N. Cohen, explica los procedimientos empleados para pasar genes de unas especies a otras, lo cual abre potencialidades hasta ahora insospechadas en un gran número de campos, como la mejora genética y el tratamiento de enfermedades hereditarias, con consecuencias imprevisibles para la propia evolución del hombre.

En resumen podemos señalar que este libro merece por lo menos la misma acogida que las anteriores recopilaciones de *Scientific American* sobre temas afines, publicadas con los títulos de "La célula viva" y "La base molecular de la Biología". "Facetas de la Genética" es un libro de consulta obligada para el especialista en Genética o Bioquímica, para el estudiante de Biología, Medicina, Veterinaria o Agronomía, y que puede resultar muy interesante para los profesores de Ciencias, científicos no especialistas y público curioso de la investigación básica en Biología. La traducción está realizada y revisada con cuidado, esmero y exactitud. El único fallo atribuible a esta edición es una cierta frecuencia de errores tipográficos tanto en los nombres de los autores como en el texto, aparte de algunos errores de interpretación de dichos nombres, que convendría corregir en posibles futuras ediciones. (E.P.).

RECENT DEVELOPMENTS IN NITROGEN FIXATION. Proceedings of the Second International Symposium. Salamanca, 1976. Editores: W. Newton, J. R. Postgate y C. Rodríguez Barrueco. Academic Press. Como indica en la introducción el profesor Bond, del Departamento de Botánica de la Universidad de Glasgow, la necesidad de los simposios sobre fijación del nitrógeno deriva de la importancia suprema del mismo en todas las formas de vida de la tierra, fundamentada en el hecho de que los ácidos nucleicos (base de la información genética de los seres vivos) y las proteínas (constituyentes plásticos mayoritarios, muchas de las cuales tienen carácter enzimático) contienen este elemento como integrante esencial, así como también por su presencia en otras moléculas de igual interés, como las clorofilas, que son los pigmentos indispensables para la transformación de la energía solar en energía química en el proceso fotosintético. Una clara y precisa respuesta a esta patente necesidad son las 37 comunicaciones presentadas por 90 investigadores de Europa (42), América (41) y Australia (7) en este 2.º Simposio de Salamanca, fecunda continuación del que tuvo lugar dos años antes en los Estados Unidos de América.

Como ocurre con todos los elementos biogenésicos, el nitrógeno está sujeto a un ciclo a escala global integrado por diversas conversiones de tipo abiótico y por una serie de complejas reacciones que acompañan a las actividades biológicas de todos los organismos; estos dos grandes tipos de transformaciones se desarrollan a través de dos subciclos fundamentales, el de precipitación-volatilización y el de fijación-denitrificación, respectivamente. A pesar de su relativa abundancia (79 por ciento en volumen en la atmósfera), el nitrógeno es un elemento limitante en los ecosistemas, ya que, en su forma molecular, no puede ser incorporado por la mayor parte de los seres vivos. Así, en la agricultura representa, con el agua, el principal factor de limitación de la producción, dado que las formas combinadas más asimilables (principalmente nitratos) son escasas en la naturaleza, lo que explica la necesidad de los fertilizantes nitrogenados sintéticos. La fijación biológica del nitrógeno atmosférico, por consiguiente, tiene el doble interés teórico de representar el mayor nivel de autotrofía para el elemento y el de cerrar el ciclo del mismo, compensando de este modo las pérdidas producidas por denitrificación, y el interés práctico de exceder en magnitud al total del abonado artificial de los cinco continentes.

La fijación del nitrógeno es una propiedad poco extendida en la biosfera, ya que se limita a algunas bacterias y algas azules que disponen del sistema enzimático (la nitrogenasa) necesario para la reducción del mismo desde el nivel molecular al nivel de amina e incorporación posterior en los propios componentes nitrogenados, utilizando para ello la energía solar directa (fi-

jadores fotosintéticos) o indirectamente (fijadores saprófitos). A pesar de que gran parte de estos organismos viven en estado libre en el suelo y el agua, existe un considerable número que vive en asociación con otros seres (particularmente plantas superiores), estableciendo con ellos una simbiosis, la más conocida de las cuales es la que se consigue entre bacterias del género *Rhizobium* y diversas especies de leguminosas, mediante la formación de nódulos radicales fijadores. Esta simbiosis tiene la gran ventaja de que no solamente contribuye a aumentar el nivel de fertilidad de los suelos sino que, además, proporciona semillas indispensables para la alimentación humana y forraje para los animales domésticos.

No obstante la discontinuidad temática de las ponencias y comunicaciones, el volumen abarca, en conjunto, un campo unitario de conocimientos y de actualización del proceso de fijación biológica, presentándose los distintos capítulos en un orden lógico y progresivo de niveles de integración creciente. Así, y desde un punto de vista conceptual, podría dividirse el libro en una serie de temas como la química del nitrógeno, el sistema nitrogenasa y otros aspectos bioquímicos y enzimáticos, la fisiología de la fijación, la genética de los genes *nif* y una serie de estudios acerca de los microorganismos fijadorès libres y de asociaciones y simbiosis.

Algunas de las comunicaciones presentan, a la vez que ciertos avances de indudable actualidad, una recopilación crítica y sintética del conocimiento en las diversas áreas generales del tema y están situadas precisamente a modo de introducción de los trabajos que les suceden formando bloques coherentes. En este sentido, cabe destacar los siguientes títulos: "Chemistry of dinitrogen" (Leigh), "The mechanisms of nitrogen fixation" (Stiefel), "Components and pathways in biological nitrogen fixation" (Orme-Johnson et al.), "Physiological aspects of nitrogen fixation" (Yates), "Genetic control of nitrogen fixation *(Nif)*" (Shanmugan et al.), "Nitrogen fixation in plants: an expanding horizon?" (Gibson et al.), "A synthesis paper on non leguminous N_2-fixing systems" (Burris) y "Physiological aspects of N_2 fixation in grass-bacteria associations" (Dobereiner).

Por lo que se refiere a la química de la fijación, el interés se centra, sobre todo, en el estudio de las reacciones de reducción mediante diversos complejos con Ti, Zr (Bercaw) y V (Nikonova et al.), así como en la investigación de las diversas series de complejos nitrogenados con metales de transición (Sellman).

En cuanto a los aspectos enzimáticos, se sintetizan diversos modelos del sistema nitrogenasa (Schrauzer) en relación con las formas oxidadas y reducidas de molibdeno; se estudia la formación de HD durante la reducción enzimática, como factor interesante en cuanto a la elucidación de los intermediarios del proceso de reducción, sugiriéndose el hecho de que la nitrogenasa opera mediante la transferencia discontinua de pares de electrones y protones (Newton); se utiliza la nitrogenasa Av para realizar una serie de experiencias sobre la cinética de los complejos ATP-Mg y del ditionito (Watt) y, mediante los datos del efecto de dilución, las reacciones cruzadas entre proteínas de distintos organismos fijadores y otros métodos; por último, se estudian los diversos componentes de la nitrogenasa (Smith et al.). En otro orden de cosas, se describe la regulación de la acumulación del molibdato (imprescindible para la nitrogenasa) en *Cl. pasteurianum,* así como las relaciones de su regulación con la regulación del propio enzima (Elliot et al.).

Respecto a las comunicaciones en torno a los organismos fijadores, se halla en el texto una investigación de aspectos de la protección frente al oxígeno y de los donadores de electrones en *A. vinelandii* (Haaker et al.), otra que trata de las interacciones celulares de las algas fijadoras de N_2 en relación con la fotosíntesis y aspectos ecológicos (Stewart) y una tercera que examina el efecto del oxígeno en los cultivos de *Rhizobium* (Bergensen), en la cual se sugiere la posibilidad de la existencia de microorganismos fijadores que requieren un suplemento de nitrógeno combinado para el crecimiento y que podrían así escaparse a la detección mediante los métodos habituales empleados en el aislamiento de las formas fijadoras.

El apartado dedicado a la genética de la fijación comprende una serie de comunicaciones acerca de las cepas mutantes *nif*⁻ en diversas bacterias fijadoras facultativas, aerobias y simbiontes (Malavich et al.), el análisis genético de la fijación (Dixon et al.), mutantes en los que la nitrogenasa es independiente de la regulación de la glutaminasintetasa (Ausubel et al.) y la obtención de plásmidos de pequeño peso molecular que contienen los genes *nif* y el operón *his* (Ausubel et al.), todo ello verificado en *K. pneumoniae,* así como dos trabajos verificados con *Rh. meliloti:* el primero (Sik et al.) muestra una correlación entre la nitratorreductasa (molibdoproteína responsable de la reducción del nitrato a nitrito en el proceso de asimilación del nitrato) y la propia nitrogenasa, a distintas condiciones ambientales; el segundo profundiza en el conocimiento de la función de la poligalacturonidasa en el proceso de infección de los pelos radicales de las leguminosas y su posible relación con ADN extracromosómico en la bacteria (Olivares et al.).

Los avances registrados en la fisiología de la fijación están integrados por estudios sobre los factores involucrados en la inducción y control de la actividad nitrogenásica de de diversas cepas de *Rhizobium* (Keister et al.), la estabilidad de la leghemoglobina (más de 18 días) en nódulos de altramuz (Dilworth et al.), las limitaciones en la fijación de nitrógeno por leguminosas (Hardy et al.), el metabolismo del hidrógeno en relación con las eficiencias relativas de la utilización de energía por la nitrogenasa en diversos simbiontes (Schubert et al.), las correlaciones entre la actividad reductora del acetileno (ARA) y factores climáticos, edáficos y fisiológicos (Balandran et al.) para la confección de modelos, la fisiología de los nódulos radicales en no leguminosas (Bond), la sugerencia de que las citokininas están involucradas en la formación y desarrollo de los nódulos radicales en especies de *Alnus* y *Myrica* (Bermúdez et al.), el estudio de los actinomicetes como endófitos en "pronódulos" y nódulos de no leguminosas (Becking), los procesos infecciosos en la nodulación del aliso (Lalonde) y una comparación de la fisiología de la simbiosis del aliso con la de las leguminosas a través del estudio de homogenados (Akkermans et al.).

Completan el panorama del simposio un artículo del profesor Nutman sobre el estado actual de la cuestión de la fijación simbiótica y un resumen de Krastanov y Riveros de actividades de la FAO en el campo de la fijación biológica del nitrógeno.

En conjunto, el texto posee un indudable interés y representa una contribución muy significativa al conocimiento del proceso, a pesar de las inevitables desigualdades entre los puntos de vista de los distintos ponentes y de la multiplicidad de enfoque, metodología y material que, si bien es en parte enriquecedora, no permite, en ocasiones, la comparación de resultados. Por otro lado, dada la abundancia de investigadores en el tema y el gran avance de la tecnología asociada al mismo, algunos de los aspectos expuestos pueden considerarse dudosos o están en franca contradicción con investigaciones más recientes.

Para citar un ejemplo, en la reunión anual de la American Society of Plant Physiologists, realizada en Virginia en junio de 1978, Sloger y Owens no encuentran ningún beneficio en la inoculación de diversos cereales con *Spirillum lipoferum* con cepas procedentes del Brasil proporcionadas por Dobereiner, contra lo que se desprende de los trabajos de esta misma investigadora en la obra que comentamos. (F.G.).

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL PRIMER ANTECEDENTE DE LA ESCRITURA

AN OPERATIONAL DEVICE IN MESOPOTAMIAN BUREAUCRACY. A. Leo Oppenheim en *Journal of Near Eastern Studies*, vol. 17 págs. 121-128; 1958.

GLYPTIQUE SUSIENNE. Pierre Amiet en *Mémoires de la Délégation archéologique en Iran*, vol. 43; 1972.

AN ARCHAIC RECORDING SYSTEM AND THE ORIGIN OF WRITING. Denise Schmandt-Besserat en *Syro-Mesopotamian Studies*, vol. 1, n.º 2; julio, 1977.

NUCLEOS LIGEROS EXOTICOS

NUCLEAR SPECTROSCOPY FROM DELAYED PARTICLE EMISSION. John C. Hardy en *Nuclear Spectroscopy and Reactions: Part C*, dirigido por Joseph Cerny. Academic Press, Inc., 1974.

ON-LINE MASS SEPARATION. R. Klapische en *Nuclear Spectroscopy and Reactions: Part A*, dirigido por Joseph Cerny. Academic Press, Inc., 1974.

DELAYED PROTON RADIOACTIVITIES. Joseph Cerny y John C. Hardy en *Annual Review of Nuclear Science: vol. 27*, dirigido por Emilio Segre. Annual Reviews, Inc., 1977.

ESTANCAMIENTO DE LAS AGUAS DEL MAR MEDITERRANEO

NILE CONE DEPOSITIONAL PROCESSES AND PATTERNS IN THE LATE QUATERNARY. A. Maldonado y D.J. Stanley, en *Canyons, Fans and Trenches*, dirigido por D.J. Stanley y G. Kelling, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., págs. 239-257, 1978.

THE MEDITERRANEAN SEA - A NATURAL SEDIMENTATION LABORATORY. Dirigido por D.J. Stanley. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., pág. 765. 1972.

STABLE ISOTOPIC FRACTIONATION, CLIMATE CHANGE AND EPISODIC STAGNATION IN THE EASTERN MEDITERRANEAN DURING THE LATE QUATERNARY. C. Vergnaud-Grazzini; W.B.F. Ryan, y M.B. Cita en *Marine Micropaleontology*, vol. 2, págs.353-370; 1977.

MASERES COSMICOS

INTERSTELLAR MASERS. Dale F. Dickinson, Marvin M. Litvak y Benjamin M. Zuckerman en *Sky and Telescope*, vol. 39, n.º 1, págs. 4-7; enero, 1970.

MICROWAVE CELESTIAL WATER-VAPOR SOURCES. K. J. Johnston, S. H. Knowles y P. R. Schwartz en *Sky and Telescope*, vol. 44, n.º 2; agosto, 1972.

COHERENT MOLECULAR RADIATION Marvin M. Litvak en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics: vol. 12*, dirigido por Geoffrey R. Burbridge. Annual Reviews Inc., 1974.

CONTEMPORARY ASTRONOMY. Jay M. Pasachoff. W. B. Saunders Company, 1977.

EL MODELADO DE LOS TEJIDOS EN LOS EMBRIONES

ANALYSIS OF MORPHOGENETIC MOVEMENTS IN THE NEURAL PLATE OF THE NEWT *TARICHA TOROSA*. Mary Beth Burnside y Antone G. Jacobson en *Developmental Biology*, vol. 18, n.º 6, págs. 537-552; diciembre, 1968.

MESODERM MOVEMENTS IN THE AMPHIBIAN NEURULA. Carl-Olof Jacobson y Jan Löfberg en *Zool. Bidrag (Uppsala)*, vol. 38, págs. 233-239; 1969.

CHANGES IN THE SHAPE OF THE DEVELOPING VERTEBRATE NERVOUS SYSTEM ANALIZED EXPERIMENTALLY, MATHEMATICALLY AND BY COMPUTER SIMULATION. Antone G. Jacobson y Richard Gordon en *The Journal of Experimental Zoology*, vol. 197, n.º 2, págs. 191-246; agosto, 1976.

TEORIA DE COMPLEJIDAD

MEMORY REQUIREMENTS IN A TELEPHONE EXCHANGE. Claude E. Shannon en *Bell System Technical Journal*, vol. 29, n.º 3, págs. 343-349; julio, 1950.

A STUDY OF NON-BLOCKING SWITCHING NETWORKS. Charles Clos en *Bell System Technical Journal*, vol.32, n.º 2, págs. 406-424; marzo, 1953.

ON CROSSBAR SWITCHING NETWORKS. Nicholas Pippenger en *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, n.º 6, págs. 646-659; junio, 1975.

LA PROTECCION DE LA PIEDRA

L'AFFERMISSEMENT STRUCTURAL DES PIERRES AVEC DES SOLUTIONS A BASE DE RESINES EPOXYDES. W. Domaslowki en *1970 New York Conference on Conservation of Stone and Wooden Objects*, págs. 85-93. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1971.

THE WHEATHERING OF NATURAL BUILDING STONES. R. J. Schaffer. Building Research Establishment, Special Report n.º 18, 1972.

PERFORMANCE CRITERIA FOR STONE TREATMENT. K. Lal Gauri, J. A. Gwinn y R. K. Popli en *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones*, págs. 143-152. National Technical University of Athens. 1976.

EL COMPORTAMIENTO ALIMENTARIO DE LOS MOSQUITOS

AËDES AEGYPTI: THE YELLOW-FEVER MOSQUITO. S. R. Christophers. Cambridge University Press, 1960.

BLOOD-FEEDING BEHAVIOR OF ADULT *AËDES AEGYPTI* MOSQUITOES. Jack Colvard Jones y Dana Pilitt en *The Biological Bulletin*, vol. 145, n.º 1, págs. 127-139; agosto, 1973.

HOST-FEEDING PATTERNS OF MOSQUITOES, WITH A REVIEW OF ADVANCES IN ANALYSIS OF BLOOD MEALS BY SEROLOGY. C. H. Tempelis en *Journal of Medical Entomology*, vol. 11, n.º 6, págs. 635-653; 10 de enero de 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

THE AMBIDEXTROUS UNIVERSE. Martin Gardner. Basic Books, Inc., 1964.

EL LIBRO DE LOS SERES IMAGINARIOS. Jorge Luis Borges., Kier. Buenos Aires, 1967.

ANIMAL ASSYMETRY. A. C. Neville. Edward Arnold, London, 1976.

A RECURSIVE APROACH TO THE CONSTRUCTION OF THE DELTAHEDRA. William McGowan en *Mathematics Teacher*, vol. 71, n.º 3, págs., 204-210; marzo, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

THE GRAVITY APROACH AND COALESCENCE OF FLUID DROPS AT LIQUID INTERFACES. G. D. M. MacKay and S. G. Mason en *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 41 págs. 203-212; octubre, 1963.

PHYSICAL SURFACES. J. J. Bikerman. Physical Chemistry Series: vol. 20. Academic Press, Inc., 1970.